



Stand der Forschung und Forschungsbedarf im Bereich Eisenbahnlärm

Prof. Dr. Ulrich Weidmann, ETH Zürich

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht, TU Berlin

Markus Maibach, infras AG



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Stand der Forschung und Forschungsbedarf im Bereich Eisenbahnlärm

Prof. Dr. Ulrich Weidmann
ETH Zürich
Institut für Verkehrsplanung
und Transportsysteme
HIL F13.1
Stefano-Francini-Platz 5
8093 Zürich

Prof. Dr.-Ing. Hecht
TU Berlin
Institut für Land und Seever-
kehr
Fachgebiet Schienenfahrzeuge
(Sekt. SG14)
Salzufer 17-19
D-10587 Berlin

Markus Maibach
INFRAS
Binzstrasse 23
8045 Zürich

Telefon: +41 44 633 33 50
Telefax: +41 44 633 10 57
weidmann@ivt.baug.ethz.ch

Telefon: +49 (0)30 314-25150
Telefax: +49(0)30 314-22529
markus.hecht@tu-berlin.de

Telefon: +41 44 205 95 08
Telefax:
markus.maibach@infrass.ch

Dezember 2015, Titelbild: fb1visuals / Andi Leemann & Jeri Peier

Kurzfassung

In diesem Bericht wird der aktuelle Stand in der Bahnlärmforschung dargestellt sowie die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Entwicklung des Bahnlärms diskutiert. Durch den Stakeholdereinbezug in Form eines Workshops konnten die unterschiedlichen Perspektiven der beteiligten Akteure zusammengetragen werden. Es werden Trends abgeleitet und daraus die vielversprechendsten Forschungsansätze evaluiert, um die Zahl der von Schienenlärm betroffenen Personen zu reduzieren.

Schlagworte

Bahnlärm, Lärmsanierung, Schienenlärm, Ressortforschung, Eisenbahnlärm

Zitierungsvorschlag

Weidmann, U., M. Hecht und M. Maibach (2015)_Stand der Forschung und Forschungsbedarf im Bereich Eisenbahnlärm, IVT; ETH Zürich

Inhaltsverzeichnis

1	Projekt.....	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzungen des Projektes	1
1.3	Randbedingungen und Abgrenzung	2
1.4	Vorgehen	3
1.5	Projektorganisation	5
2	Stand der Bahnlärmforschung	6
2.1	Übersicht.....	6
2.2	Infrastruktur.....	6
2.3	Rollmaterial	17
3	Einflussfaktoren auf die Entwicklung des Bahnverkehrs	30
3.1	Übersicht.....	30
3.2	Entwicklung der Umfeldfaktoren	31
3.3	Rollmaterialmarkt.....	43
3.4	Infrastrukturbewirtschaftung	45
3.5	Räumliche und gesellschaftliche Entwicklungen	46
4	Stakeholdereinbezug	47
4.1	Teilnehmerkreis	48
4.2	Ergebnisse	49
4.3	Ergebnisse Gruppenarbeiten.....	53
5	Analyse des Status-Quo der Teilsysteme Bahn und Ausdifferenzierung der Verkehrsleistungen	59
5.1	Analyse des Verkehrs.....	59
5.2	Analyse des Rollmaterials	61
5.3	Analyse der Bahninfrastrukturen	66
6	Effizienzanalyse der Forschungsfelder	69
6.1	Trends.....	69
6.2	Bestimmung der Forschungsfelder	70

7	Forschungsprogramm.....	72
7.1	Weiterentwicklung des Gesamtsystems Güterwagen	73
7.2	LCC-, lärm- und erschütterungsoptimierter Oberbau	74
7.3	Reduzierung der Kurvengeräusche durch radiale Einstellbarkeit der Radsätze....	76
7.4	Reduzierung von Einzelstößen	77
7.5	Praxistauglicher schalloptimierter Radsatz.....	78
7.6	Innovation Gleisbaumaschinen	80
8	Literatur.....	82

1 Projekt

1.1 Ausgangslage

Im Jahr 2000 waren in der Schweiz 265'000 Menschen schädlichem oder lästigem Eisenbahnlärm ausgesetzt. Zu ihrem Schutz wird nach Massgabe des Bundesgesetzes vom 24. März 2000 über die Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLEalt) bis 2015 ein umfassendes Konzept zur Lärmreduktion umgesetzt. Es beinhaltet Massnahmen am Rollmaterial, die Realisierung von Lärmschutzwänden und den Einbau von Schallschutzfenstern. Damit können unter weitgehender Einhaltung der Fristen und mit einer wesentlichen Unterschreitung der ursprünglich geschätzten Kosten zwischen 160'000 und 170'000 Menschen vor dem Lärm geschützt werden.

Das im Gesetz formulierte Minimalziel zur Anzahl der zu schützenden Personen (Schutzgrad) von mindestens zwei Dritteln wird mit 60 – 64 % jedoch knapp nicht erreicht.

Das Parlament trat deshalb im Rahmen der Beratung der Gesamtschau FinöV (ZEB-Gesetz) nicht auf eine Kürzung des Lärmkredites ein. Es verlangte, dass mit den verbleibenden Finanzmitteln eine Verbesserung des Lärmschutzes zu erreichen sei.

Im Rahmen des revidierten Lärmsanierungsgesetzes sind zur Vergrösserung der Massnahmenpalette zur Lärmbekämpfung unter anderem Investitionsförderungen und Ressortforschung vorgesehen (Art. 10a BGLE).

Gemäss Art. 16 Abs. 1 des Bundesgesetzes über die Förderung der Forschung und der Innovation ist Ressortforschung Forschung (FIFG), welche von der Bundesverwaltung initiiert wird, weil sie die Resultate zur Erfüllung ihrer Aufgaben benötigt. Unter die Ressortforschung fällt jede Art von wissenschaftlicher Forschung, die die Bundesverwaltung initiiert, weil die entsprechende Forschung im Kontext des Verwaltungshandelns im öffentlichen Interesse liegt.

1.2 Zielsetzungen des Projektes

Das Ziel der Ressortforschung ist, dass bei zukünftigen Angebotserweiterungen im Bahnverkehr die Lärmzunahmen durch den zunehmenden Verkehr durch geringere Lärmemissionen pro gefahrenen Zug kompensiert werden können. Hierzu ist neben der Anwendung bereits entwickelter und erprobter Massnahmen zum Lärmschutz eine Erweiterung des Massnahmenportfolios bei der Lärmreduktion im Eisenbahnbereich erforderlich.

Das BAFU möchte für die Weiterentwicklung des Massnahmenportfolios die Entwicklung von Lärmschutzmassnahmen aktiv unterstützen und will entsprechende Forschungsvorhaben fördern. Hierzu ist eine Evaluierung und Priorisierung von potenziellen Forschungsthemen im Eisenbahnlärbereich nötig.

Dieser Bericht gibt einen Überblick über den Stand der Forschung im Bereich Eisenbahnlärm und leitet den hauptsächlichen Forschungsbedarfs ab. Er zeigt die für eine effiziente Lärmreduktion vordringlich zu bearbeitenden Forschungsfelder auf, so dass die vorhandenen Forschungsmittel wirkungseffizient eingesetzt werden können.

Auftraggeber

Auftraggeber ist das Bundesamt für Umwelt, vertreten durch Christoph Wenger.

Auftragnehmer

Auftragnehmer ist das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), vertreten durch Prof. Dr. Ulrich Weidmann. Als Unterauftragnehmer des IVT werden das Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Schienenfahrzeuge der TU Berlin und die Infras AG in das Projekt einbezogen.

1.3 Randbedingungen und Abgrenzung

Die Forschungsthemen können aus den Bereichen Grundlagenforschung und angewandte Forschung kommen und im Stadium der Entwicklung, der Erprobung, Adaptierung oder der Zulassung sein. Dabei sind folgende Themenfeldern nicht der Ressortforschung Eisenbahnlärm zuzuordnen und daher nicht in die Evaluation einzubeziehen:

lärmspezifische Massnahmen, die auf dem Ausbreitungsweg des Schalls ansetzen wie z. B. bei Lärmschutzwänden oder Schallschutzfenster,

Entwicklung von Anreizsystemen für den Einsatz von lärmemissionsarmen Technologien,

Gesundheitliche Aspekte (Dosis-Wirkung, Tag / Nacht, umweltpsychologische Aspekte),

Weiterentwicklung von Methoden und Technologien mit verbesserter Kosten / Nutzen-Bilanz zur Minderung der Erschütterungen im Bahnbereich und

Evaluation Lärmschutzpolitik - Wirkungen der bisherigen Massnahmen, Stärken / Schwächen von bisher durchgeführten Massnahmen.

1.4 Vorgehen

Für die Bearbeitung der Studie wurden folgende Arbeitspakete gebildet:

1.4.1 AP 1 State-of-the-art in der Bahnlärmforschung

Literaturanalyse zum Stand der Technik bei der Lärmbekämpfung im Bahnbereich; Identifikation und Klassifizierung von Forschungslücken; Ableitung erster vielversprechender Forschungsideen

1.4.2 AP 2 Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Entwicklung des Bahnverkehrs

Abschätzung der Entwicklung der lärmrelevanten Parameter des Eisenbahnverkehrs. Hierzu wurden bestehende Prognosen und Studien analysiert. Eine Befragung von Marktteilnehmern mit Ausnahme des Workshops in AP 3 war nicht vorgesehen. Es wurden die Entwicklungen in folgenden Bereichen analysiert:

Entwicklung des Marktes: Mengenentwicklungen für die einzelnen Marktsegmente und lärmrelevanten Bereiche des Bahnsektors

Technische Innovation: Absehbare wesentliche technische Entwicklungen, insbesondere für die Kapitel Fahrzeuge und Infrastruktur

Strategien der marktrelevanten Marktteilnehmer: Strategien in den Bereichen Verkehr, Fahrzeuge und Infrastruktur der relevanten Marktteilnehmer

Politische Einflüsse: Relevante nationale und internationale gefällte oder absehbare politische Entscheidungen sowie die Trends in der Lärmpolitik

Sozio-ökonomische Aspekte: Entwicklung des Bahnverkehrs, seiner Fahrzeuge und der Bahninfrastruktur, relevante Einflüsse des demographischen und gesellschaftlichen Wandels und der absehbaren wirtschaftlichen Entwicklung, insbesondere auch bezüglich Personen- und Warenströmen

1.4.3 AP 3 Stakeholdereinbezug

Einbezug der Stakeholder im Eisenbahnsektor im Rahmen eines Workshops. Es wurden nur die Stakeholder einbezogen, die eigene Handlungsoptionen für eine Lärmreduktion haben, wie Infrastrukturbetreiber, Rollmaterialeigner etc. Rein passive Betroffene, wie Eisenbahnverkehrsunternehmen ohne eigenes Rollmaterial wurden, um die Zahl der Stakeholder überschaubar zu gestalten, nicht berücksichtigt. Es wurden die Handlungsoptionen der Stakehol-

der in Bezug auf eine Reduktion der Lärmemissionen evaluiert. Dabei erfolgte ein Einbezug eigener Forschungsideen und Forschungsvorhaben der Stakeholder. Ausserdem wurden aus Stakeholder-Sicht die Forschungsideen aus AP 1 auf die Umsetzbarkeit hin bewertet. Es wurden ausserdem die Trends aus AP 2 mit den Stakeholdern diskutiert. Ausserdem wurden erste Grundlagen für die in AP 4 zu ermittelten Trends aus Stakeholder-Sicht ermittelt.

1.4.4 AP 4 Analyse des Status-Quo der Teilsysteme Bahn

Es wird ein Überblick über den Status-Quo der wesentlichen lärmrelevanten Teilsysteme der Bahn gegeben. Diese sind der Betrieb sowie das heute in der Schweiz eingesetzte Rollmaterial und die Infrastruktur:

Bei der Analyse des Verkehrs (Betrieb) werden die verschiedenen lärmrelevanten Einflussfaktoren (v. a. Verkehrsführung örtlich / zeitlich, Beschleunigung, Geschwindigkeit) in Bezug auf ihren Einfluss auf Lärmreduktionspotenziale erörtert.

Bei der Analyse des Rollmaterials wird sowohl das Rollmaterial von Schweizerischen als auch von ausländischen Wagenhaltern berücksichtigt. Dabei erfolgt eine Ausdifferenzierung des Rollmaterials in einzelne Kategorien bezogen auf die lärmtechnischen Eigenschaften.

Die Analyse der Bahninfrastrukturen erfolgt im Hinblick auf die technische Ausgestaltung, insbesondere Art und Zustand des Oberbaus, der Unterhaltsvorgaben und angewendeten Unterhaltsverfahren sowie der Trassierungsparameter und der verwendeten Gleisverbindungselemente.

1.4.5 AP 5 Ausdifferenzierung der Verkehrsleistungen und Ableitung von Trends

Im AP 5 erfolgt zunächst eine Ausdifferenzierung der Verkehrsleistungen der Eisenbahnen, differenziert nach Verkehrsarten (Personen- und Güterverkehr). Auf Grundlage der wichtigsten Trends im Bereich Rollmaterial und Oberbau erfolgt eine Prognose hinsichtlich der Zusammensetzung des Rollmaterials und der Oberbauformen auf einen Horizont 2020+. Dieses Grobgerüst dient als Basis für die Abschätzung der Relevanz der einzelnen Themen.

1.4.6 AP 6 Ableitung eines Forschungsprogramms

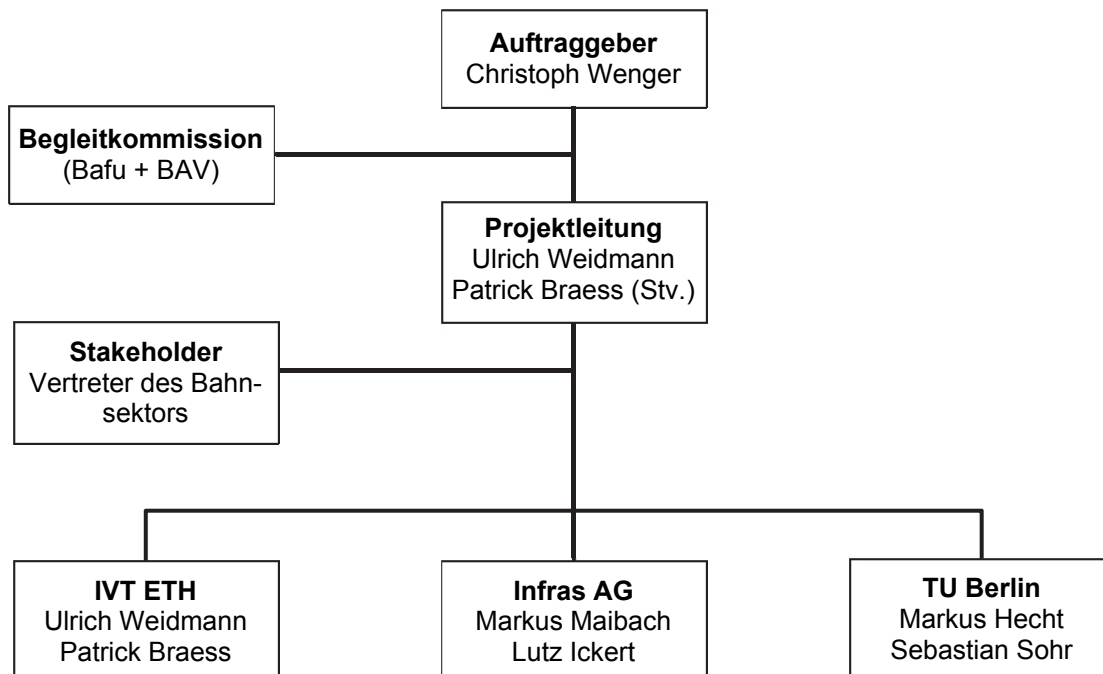
Ausgehend von den Ergebnissen der AP 2 bis AP 5 werden diejenigen 5 bis 7 Themenfelder im Bahnsektor ermittelt, bei denen die Lärmzunahme am signifikantesten ist und die damit ursächlich für die Lärmbelästigung der meisten Personen sind. Für diese Themenfelder wird auf Grundlage des in AP 1 ermittelten aktuellen Stands der nationalen und internationalen Forschung der zukünftige Forschungsbedarf abgeleitet. Dieser Forschungsbedarf wird in Vor-

schläge zu Forschungsprojekten für einen Zeithorizont bis 2020 umgesetzt. Der Entwurf des Forschungsprogramms wird im Rahmen eines halbtägigen Workshops mit einer Begleitkommission aus Vertretern des Bundesamtes für Umwelt und des Bundesamtes für Verkehr diskutiert und bereinigt.

1.4.7 AP 7 Bericht

Zusammenfassung der Ergebnisse in einem Schlussbericht, einschliesslich Faktenblättern für die einzelnen Teilsegmente der Verkehrsnachfrage.

1.5 Projektorganisation



2 Stand der Bahnlärmforschung

2.1 Übersicht

In diesem Abschnitt wird der aktuelle Stand der Bahnlärmforschung diskutiert, gegliedert nach Infrastruktur und Rollmaterial. In der folgenden Übersicht werden die einzelnen Lärmfaktoren aufgezeigt.



Bild 1: Übersicht über die Lärmquellen, eigene Darstellung

2.2 Infrastruktur

Schallemissionen treten infrastrukturseitig an drei verschiedenen Stellen auf: An der freien Strecke, an den Knoten (Bahnhöfe und Abstellanlagen) sowie beim Unterhalt dieser Anlagen. Auf der freien Strecke ist zu unterscheiden zwischen dem Lärm, welcher massgeblich durch die vorhandenen Oberbaukomponenten beeinflusst wird (Kap. 2.2.1), und den „Hot Spots“,

also Umgebungen, wo durch besondere Elemente (Brücken, Weichen, Stösse etc.) Lärm entsteht (Kap. 2.2.2).

2.2.1 Reguläre Fahrbahn

Die Fahrbahn besteht aus den Elementen Schotter, Schwellen, Zwischenlagen und Schienen. An allen Komponenten wurde intensiv geforscht, jedoch meist in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit und die Lebenszykluskosten. Da die Fahrbahn sowie deren Unterhalt ohnehin zu einem erheblichen Teil zum finanziellen Aufwand des Eisenbahnbetriebs beitragen, wird eine Optimierung hinsichtlich des Lärms meist von den Infrastrukturbetreibern nur akzeptiert, wenn die Kosten dadurch nicht erhöht werden. Im Folgenden werden die verschiedenen Elemente genauer betrachtet sowie der aktuelle Stand der Forschung diskutiert. Die Elemente des Oberbaus werden vom Querschnitt von unten nach oben behandelt.

Unterschottermatten

Verkehr verursacht nicht nur direkten Luftschall, sondern auch Körperschall. Dieser kann sich über den Boden auf angrenzende Bebauung übertragen und dort Bauteile anregen, wodurch sekundärer Luftschall entsteht (siehe Abbildung 1: Entstehung von sekundärem Luftschall, Quelle: designhaus, Berlin).

Unterschottermatten (USM) werden zwischen Planum und Schotter verlegt. USM haben den Zweck, die Übertragung von Schwingungen und Vibrationen zu verringern. Die Effektivität hinsichtlich des direkten Luftschalls wird derzeit je nach Studie widersprüchlich wiedergegeben. So konnte laut [DB Netze, 2012] kein Einfluss auf die direkte Schallabstrahlung nachgewiesen werden, [Prose, 2015] lässt hingegen die Vermutung aufkommen, dass USM den Schalldruckpegel sogar erhöhen. Ein Grund dafür könnte sein, dass USM zu einer Erhöhung der Schienenrauheit führen. Hier bedarf es weiterer Forschung.

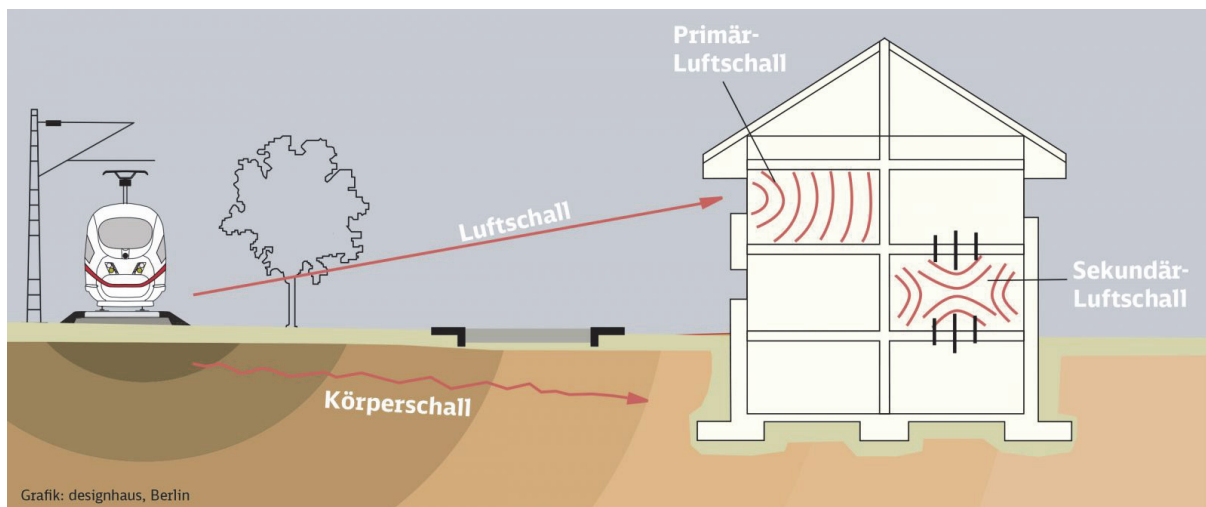


Abbildung 1: Entstehung von sekundärem Luftschall, Quelle: designhaus, Berlin

Schotter

Der Schotter besteht je nach Land aus unterschiedlichem Gestein. Ob verschiedene Gesteinssorten Einfluss auf die Lärmentwicklung haben, wurde bisher nicht untersucht. Jedoch haben die Infrastrukturbetreiber keine grossen Auswahlmöglichkeiten. Als Massengut sind es überwiegend die Transportkosten, welche den Preis beeinflussen. Somit sind kurze Transportwege sowie technische Eigenschaften ausschlaggebend für die Wahl des Lieferanten.

Um die Stabilität der Gleislage zu verbessern, gibt es Verfahren, um den Schotter nach Stopfung und Ausrichtung des Gleises zu verkleben. Gleichzeitig soll dies in einem gewissen Rahmen die Schallabsorption erhöhen und sich somit lärm mindernd auswirken. Die existierenden Verfahren werden jedoch nur versuchsweise oder in sehr geringem Umfang angewendet. Primär wäre hier auch eher die Dauerhaftigkeit der guten Gleislage ausschlaggebend für die Entscheidung, den Schotter zu verkleben. Bei Versuchen konnten keine signifikanten Pegelminderungen oder Pegelerhöhungen nachgewiesen werden [DB Netze, 2012]

Schwellen

In der Schweiz werden verschiedene Schwellentypen eingesetzt: Holz, Stahl, Beton und versuchsweise auch Kunststoff (BLS). In Tunneln oder auf Brücken wird auch die feste Fahrbahn verwendet. Jeder Schwellentyp hat seine optimalen Einsatzbereiche und unterschiedliche Vor- und Nachteile. Bezüglich des Einflusses auf die Lärmentwicklung sind die vorhandenen Untersuchungen widersprüchlich: Je nach Messung sind entweder Betonschwellen um rund 2 dB(A) lauter als andere Schwellentypen [Fendrich, 2013], oder sie sind gleich laut. Problematisch bei Messungen sind häufig die nicht konstanten Randbedingungen.

Aufgrund des langen Lebenszyklus der Fahrbahn hat die Dauerhaftigkeit einen erheblichen Einfluss auf die Lebenszykluskosten. So ist mit der Dauerhaftigkeit einerseits die maximale Lebensdauer gemeint, andererseits die langfristige Gewährleistung einer guten Gleislage, so dass Unterhaltsmassnahmen nur in längeren Zeitabständen geplant werden müssen. Ausschlaggebend für die Wahl des Schwellentyps sind somit ökonomische Überlegungen sowie technische Randbedingungen. Die Aufbauhöhe bei Betonschwellen ist z. B. heute noch erheblich grösser als bei Holzschwellen. Wechselt man nun den Schwellentyp, hat dies oft erhebliche Folgekosten. So wird im Tunnel die Verwendung von Betonschwellen meist nur möglich sein, nachdem die Tunnelsohle abgesenkt wurde, sofern dies bautechnisch möglich ist. Auch im Bahnhofsbereich ist die Aufbauhöhe entscheidend, um den ebenerdigen Einstieg zu gewährleisten. Da hier meist Fussgängerunterführungen vorhanden sind, ist eine Absenkung der Fahrbahn nicht möglich, so dass der Einsatz von Betonschwellen in Bestandsanlagen eine Anhebung des gesamten Perrons erfordern würde.

In der Schweiz werden in den letzten Jahren vermehrt besohlte Betonschwellen verbaut. In anderen Ländern ist dies bereits die Standardbauweise. Die Hauptvorteile liegen in der höheren Gleislagestabilität. Die Auswirkungen der Schwellenbesohlung auf die Erschütterungen werden als günstig angesehen, auf den Luftschall wegen der Entkopplung allerdings als negativ vermutet. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

Schienen

Schienen gehören zu den einheitlichsten Produkten überhaupt im Gleisbau. Da die Schienenproduktion ein sehr aufwändiger und anspruchsvoller Prozess ist, gibt es in Europa und auf der Welt nur wenige Walzwerke für Schienenstahl. Im SBB Netz werden nur die Profile 46E1 (SBB I), 54E2 (SBB IV) und 60E1 bzw. 60E2 (SBB VI) verwendet. Änderungen an den Schienenprofilen gab es in den letzten Jahren hauptsächlich durch die Erhöhung des Härtegrades, welcher zu geringerem Verschleiss führt.

Um den Einfluss der Schienenform auf die Lärmentwicklung zu eruieren, wurden bei den SBB asymmetrische Schienenprofile getestet. Die Idee dahinter war, durch die Formveränderung die akustische Anregbarkeit der Schiene zu verringern. Bei der Untersuchung wurde jedoch kein Einfluss festgestellt. Auch im 6. EU Forschungs-Rahmenprogramm [EU 2008] wurde das neu von Voestalpine entwickelte Schienenprofil VA71b getestet. Das schwerere Schienenprofil (gegenüber einer 60E1) führte zu konträren Ergebnissen: Je nach Geschwindigkeit und Rollmaterial kam es zu Pegelminderungen, aber auch zu Pegelerhöhungen.

Ein funktionierender Ansatz ist die Verwendung von Schienenstegdämpfern (SSD) und Schienenstegabschirmungen (SSA). Die Funktionsweise dieser an der Schiene fixierten Ele-

mente ist unterschiedlich. Schienenstegdämpfer dienen durch ihre Masse dazu, die Eigenfrequenz der Schiene zu verändern und so die akustische Anregung der Schiene zu verringern. Schienenstegabschirmungen funktionieren wie Mini-Lärmschutzwände, die direkt an der Quelle angebracht sind und so frühzeitig den Ausbreitungsweg des Schalls behindern. Die Effektivität dieser Massnahmen ist abhängig vom Rollmaterial und erreicht eine maximale Reduktion von 3 dB [DB Netze, 2012].

Im Rahmen eines deutsch-französischen Forschungsprojekts STARDAMP wurde ein Laborverfahren zur Ermittlung des Lärminderungspotenzials von Schienendämpfern entwickelt [STARDAMP, 2015]. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass keine aufwändigen Feldtests notwendig sind, sondern die Wirksamkeit von Schienendämpfern objektiv und kostengünstig im Labor ermittelt werden kann.

Nach Erfahrungen der ÖBB kann es durch die Verwendung von Schienenstegdämpfern gerade im Bogen zu einer beschleunigten Schlupfwellenbildung kommen. Die Möglichkeit der Spaltkorrosion und in weiterer Folge der Möglichkeit des Abbrechens des Schienenkopfes ist noch nicht untersucht worden.

Die Einflüsse des Schienenschleifens werden in Kapitel 2.2.3 Unterhalt und Bau genauer erläutert.

2.2.2 Lokale Einzelstellen

Die Betrachtung lokaler, lärmverursachender Einzelstellen ist von erheblicher Bedeutung. So kann der entstehende Lärm an diesen Stellen die sogenannte Aufwachschwelle¹ überschreiten, so dass Massnahmen, welche auf die Gesamtoptimierung des Oberbaus abzielen, an diesen Orten nicht ausreichend sind.

Schienenstösse

Schienen können je nach Schienenwerk bis zu Längen von 120 m gewalzt werden. Aus Transport- und Verladegründen werden dieses Langschienen häufig geschnitten, um zu den jeweiligen Einbauorten transportiert zu werden. Vor Ort werden die Schienen in der Regel

¹ Das Gehör ist das entscheidendste Warn- und Kommunikations-Organ des Menschen. Es ist deshalb Tag und Nacht gegenüber der Umwelt geöffnet sein und kann sich nicht - wie das Auge mit seinen Lidern für Lichtreize - für Schallreize verschließen. Dies ist die Ursache dafür, dass im Wach- und Schlafzustand Schalle aus der Umwelt stets aufgenommen werden und damit Erregungen im verarbeitenden Gehirn auslösen. Im Schlaf wird ab der sogenannten Aufwachschwelle der Lärm als Gefahr wahrgenommen und das Bewusstsein in Gang gesetzt, was zu einem Aufwachen führt.

wieder verschweisst, meist aufgrund seiner Flexibilität mit aluminothermischen Schweissverfahren. Bei grösseren und industrialisierten Baustellen, bzw. falls höhere Genauigkeiten und Qualitäten gefordert sind wie im Hochgeschwindigkeitsverkehr werden auch mobile Ab-brennstumpfstossschweissmaschinen eingesetzt.

Jeder Stoss, ob geschweisst oder nicht, stellt für die Schiene und somit für den Fahrzeuglauf einen Kontinuitätsunterbruch dar. Zu unterscheiden sind drei Arten von Schienenstössen:

- Geschweisste Stösse sind bei korrekter Ausführung und Feinschliff nicht lärmrelevant. Nichtsdestotrotz stellt auch ein geschweisster Stoss immer eine Schwachstelle im Gleis dar. Durch den Schweissprozess entstehen Gefügeveränderungen im Stahl, die dazu führen können, dass Schienenfehler entstehen und ein Stoss lärmtechnisch wieder relevant wird.
- Isolierstösse dienen der Gleisfreimeldung und sind Teil der Sicherungsanlage. Aufgrund der Bohrungsdurchmesser der isolierten Laschen werden keine Bewegung zugelassen, zusätzlich sind diese verklebt.
- Des Weiteren gibt es Dehnungsstösse, welche die tangentielle Längenausdehnung im Fall thermischer Belastung nicht behindern und somit ein Entspannen der Schienenlängskräfte fördern. Dehnungsstösse kommen nur noch in normalspurigen Bögen mit kleinen Radien vor ($R < 300 \text{ m}$). Meterspurige Bahnen dürfen laut Reglement sämtliche Kurvenradien verschweissen. Hier sind derzeit Forschungsarbeiten im Gang [Bopp, 2014].

Bezüglich den Isolierstössen gibt es derzeit zwei Ansätze. Schräge Isolierstösse sollen den Übergang von einer Schiene auf die andere von einer punktförmigen Belastung zu einem linienförmigen Belastungswechsel verhelfen. In der Praxis gibt es jedoch noch Probleme mit der Dauerfestigkeit der schrägen Isolierstösse, da bei den im 60 Gradwinkel geschnittenen Schienen² zu hohe Spannungen in den spitzen Enden auftreten. Besser, und langfristig die zu erwartende Entwicklung, ist der komplette Verzicht auf die Gleisfreimeldung durch Gleisstromkreise. Auf diese Art kann auf die Isolierstösse verzichtet werden.

Weichen

Weichen bilden zwangsläufig einen Kontinuitätsunterbruch in der Fahrbahn. Es besteht die Möglichkeit der Optimierung, in dem bewegliche Herzstücke verwendet werden und es so

² nur der Schienenkopf wird schräg geschnitten, der Steg und Fuss werden weiterhin rechtwinklig geschnitten, um Längsdruckkräfte zu übertragen

wie bei Weichenzungen zu einem kontinuierlichen Übergang kommt. Weichen mit beweglichen Herzstücken kommen derzeit auf Grund ihrer höheren Anschaffungskosten und Instandhaltungskosten nur auf Schnellfahrstrecken zum Einsatz. Der Mehrpreis entsteht durch zusätzlich notwendige Motoren, um das Herzstück zu positionieren. Auch muss der Herzstückbereich mit einer Weichenheizung ausgerüstet werden, um Störungen im Winter zu vermeiden. Positiv sind der geringere Verschleiss am Herzstück, der ruhigere Fahrzeuglauf sowie die geringeren Schallemissionen. Die aktuelle Forschung beschäftigt sich derzeit überwiegend damit, starre Herzstücke widerstandsfähiger zu machen. Dazu werden neue Legierungen verwendet, welche die Lebensdauer der Herzstücke erhöhen. Dies hat einen positiven Einfluss auf die Lebensdauer, der Lärm wird dadurch jedoch nicht gesenkt. Auch findet Forschung zur Geometrie des Weichenherz-Übergangspunktes statt.

An manchen Orten können Schutzweichen durch Entgleisungsvorrichtungen ersetzt werden, jedoch ist dies ohnehin ein Anliegen der Infrastrukturbetreiber, da die Kosten für den Unterhalt der Weichen hoch sind. Dies ist aufgrund der Reglemente nicht überall möglich. Für sehr selten benutzte Gleise (z. B. Abstellgleise für fahrbare Unterwerke) besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Weiche so umzubauen, dass das Herzstück durch eine durchgehende Schiene ersetzt wird. Sie ist dann ohne erneuten Umbau in der Ablenkung nicht befahrbar.

Brücken

Die Ingenieurbauwerke des schienengebundenen Verkehrs bilden einen grossen Teil des Anlagevermögens. Die Lebensdauer ist meist auf 100 Jahre ausgelegt, so dass auch heute noch viele Stahlbrücken mit offener Fahrbahn im Bestand und in Betrieb sind. Durch die Überfahrt eines Zuges können diese angeregt werden, so dass erheblich mehr Lärm entsteht. Da die vorhandenen Stahlbrücken unterschiedlich sind in ihrer Konstruktion, gibt es keine pauschale Lösung. Jede Brücke muss gesondert betrachtet werden. In vielen Fällen können Schallabsorber die Eigenschwingungsfrequenzen senken [DB Netze, 2012], ähnlich wie bei den Schienenstegdämpfern. Bei ausreichender Tragfähigkeit und Lichtraumprofil kann eine Schotterfahrbahn die Fahrbahn von der Tragkonstruktion entkoppeln und so die Schwingungsanregung mindern, Unterschottermatten können diesen positiven Effekt verstärken. Bei Neubaubrücken aus Stahl entspricht eine durchgehende Schotterfahrbahn und Entkopplung zur Tragkonstruktion dem Stand der Technik, allenfalls kommen Sonderlösungen (eingebettete Schiene) zur Anwendung.

Stationäre Bremsanlagen

In den Güterbahnhöfen werden die Güterwagen über einen Ablaufberg gedrückt und über mehrere Weichen auf unterschiedlichen Richtungsgleisen zu neuen Zügen zusammengestellt.

Um die Gewichtsunterschiede und Laufeigenschaften der verschiedenen Wagen ausgleichen zu können und die Weichen richtig zu stellen, werden die Güterwagen durch Balkengleisbremsen so abgebremst, dass der Auflaufstoss minimiert wird. Beim Bremsvorgang können hochfrequente Quietschtöne entstehen, die sehr weit tragen und so zur einer erheblichen Lärmbelästigung der Anwohner führen.

Bei der Installation von Reibmodifikatoren werden die Güterwagenräder mit einem Schmiermittel versehen. Dadurch sinkt die Häufigkeit des Schienenkreischens erheblich. Die Technik ist erprobt und wird bereits bei mehreren Rangierbahnhöfen eingesetzt. Auch kann der Einsatz von Keramikbremsen an den Bremsbalken die entstehenden Kreischgeräusche vermindern.

Enge Bögen

Beim Durchfahren enger Bögen kann das vordere äussere Rad des ersten Fahrzeuges (Meistens die Lokomotive oder ein Triebkopf) mit dem Spurkranz an der Schiene anlaufen. Die Konizität der Räder reicht in diesem Fall nicht aus, um den Längenunterschied zwischen Innen- und Aussenschiene auszugleichen. Dabei können Kreisch- und Knackgeräusche entstehen, welche sehr hohe Pegel erreichen können. Dies ist abhängig vom Fahrzeug und den Drehgestellen, auf welche im Kapitel 2.2 eingegangen wird. Infrastrukturseitig können Schienenflankenschmiereinrichtungen und Schienenkopfkonditionieranlagen die Lärmemissionen erheblich reduzieren. Auch gibt es Anlagen, die die Schienen nur mit Wasser benetzen. Egal ob mit Schmiermittel oder Wasser, so sind diese Anlagen ortsgebundenen und können nur in einem geringen Umkreis die entstehenden Geräusche reduzieren. Der Wartungsaufwand ist nicht zu vernachlässigen, jedoch sinkt auch die Abnutzung der Schienen in diesen Bereichen (bei Schienenflankenschmiereinrichtungen).

2.2.3 Unterhalt und Bau

Der Unterhalt und Bau von Eisenbahninfrastrukturen führt durch den hohen maschinellen Einsatz zu erheblichen Lärmemissionen, dies vorwiegend in der Nacht, in Sperrpausen und Unterhaltsintervallen. Der jährliche Gesamtumfang ist bei freien Strecken jedoch gering. Je nach Streckenklasse kommt es durchschnittlich alle 5 Jahre zu einer Stopfung³. Die präventive Schienenbearbeitung ist derzeit noch nicht vollständig systematisiert, da die Abnutzung abhängig ist von der Zugbelastung, der Art des Rollmaterials sowie den Oberbauparametern.

³ Durch den Verkehr kann sich die Gleislage im Laufe der Zeit verschlechtern, was zu Komforteinbussen sowie zu einem höheren Verschleiss führt. Durch eine Stopfung wird das Gleis wieder in die gewünschte Lage gebracht und der Schotter um die Schwellen herum mit Stopfpickeln verdichtet.

Im Bereich von Bahnhöfen kommt es zu einem vermehrten Unterhaltsaufwand durch Reparaturen an Weichen und Gleisdurchschneidungen, so dass hier ein nicht unerhebliches Störungspotential vorliegt. Alle 25-30 Jahre ist mit umfangreicheren Gleisumbauarbeiten zu rechnen, welche sich über einen längeren Zeitraum erstrecken und somit eine weit grössere Belastung darstellen.

Schienenbearbeitung (Schleifen, Hobeln, Fräsen)

Die Schiene ist direkter Kontaktpunkt bei der Interaktion von Rollmaterial und Oberbau. Sie ist erheblichen Lasten und Spannungen ausgesetzt, dies führt einerseits zu Abnutzungen sowie Schienenfehlern. Durch zunehmenden Verkehr, höhere Antriebskräfte sowie höhere Achslasten werden die Schienen umso stärker beansprucht, so dass Erhaltungsmassnahmen umso häufiger notwendig sind. Für die unterschiedlichen Schädigungen haben sich verschiedene Bearbeitungstechniken etabliert. Diese lassen sich grob in Schleifen, Fräsen und Hobeln einteilen.

Fräsen und Hobeln erlauben einen grossen Materialabtrag der Fahrfläche. Dies kann notwendig sein z. B. im Falle von Head Checks, falls bereits ein fortgeschrittenes Risswachstum festgestellt wird. Die Arbeitsweis ist relativ langsam und kann somit nur in Sperrpausen durchgeführt werden. Der grosse Materialabtrag verringert im erheblichem Masse die Restmenge an Profil, welches zur Abnutzung zur Verfügung steht, jedoch ist dies manchmal die einzige Methode, um die Schienen weiter benutzen zu können, ohne dass sie sofort getauscht werden müssen bzw. das Risiko eines Schienenbruchs besteht.

Rotierendes Schleifen ist sehr flexibel in der Anwendung, da die Schleifsteine in ihrem Winkel frei eingestellt werden können. Abgenutzte Schienen können so wieder auf das Sollprofil geschliffen werden und so weiter benutzt werden, was sich positiv auf die LCC der Schiene auswirkt. Oszillierendes Schleifen nach dem Rutschersteinprinzip erzeugt bzgl. der akustischen Fahrflächenqualität die besten Ergebnisse, und wird somit eingesetzt für das akustische Schleifen. Das neuere Verfahren des High-Speed-Grinding (HSG) erlaubt das Schleifen der Schienen bei Geschwindigkeiten bis zu 80 km/h. Dies erlaubt den Einsatz der Schienenschleifzüge weitgehend im regulären Fahrplan, so dass keine Sperrungen bzw. Nacharbeiten vorgesehen werden müssen. Der Materialabtrag ist jedoch geringer als bei den anderen Verfahren.

Bzgl. der Lärmentwicklung haben die diversen möglichen Schienenfehler unterschiedliche Auswirkungen. Head-Checks haben z. B. keinen Einfluss auf die Schallemissionen. Riffel in der Fahrfläche führen hingegen zu einer starken Anregung der Schiene durch das rollende Rad. Durch regelmässiges Schleifen wird die Riffelbildung verringert. Durch das Schleifen

steigt die Oberflächenrauheit primär an und auch der entstehende Luftschall erhöht sich, jedoch sinkt nach entsprechender Anzahl Zugüberfahrten der Emissionspegel unter den Ausgangswert. Derzeit wird an der ETH Zürich daran geforscht [IWF, 2015] die anfängliche Pegelzunahme nach einem Schleifdurchgang zu reduzieren.

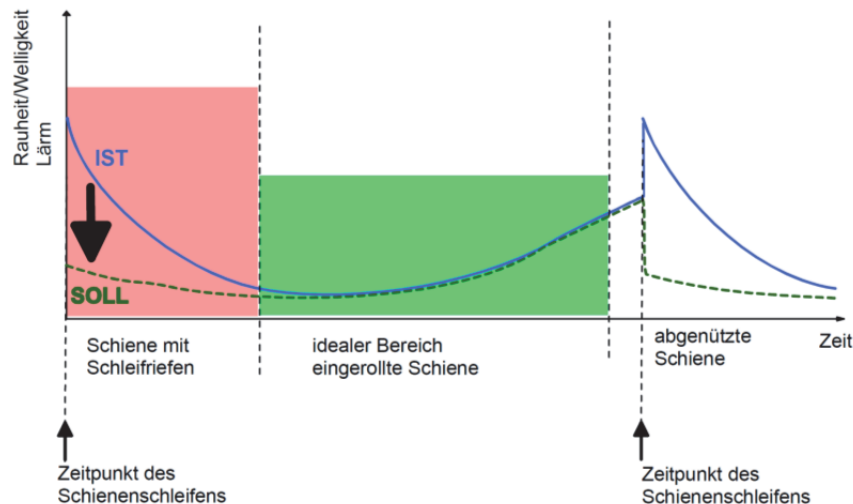


Abbildung 2: Entwicklung der Schienenrauheit [IWF,2015]

Wenn man die Wirksamkeit nach Fahrzeugkategorien aufzeichnet fällt auf, dass das akustische Schienenschleifen die grösste Lärmreduktion bei den scheibengebremsen Personenwagen bringt. Über die Jahre steigt der Schalldruckpegel dann überproportional im Vergleich zum Güterverkehr an [Abbildung 3]. Dies zeigt jedoch auch, dass die Auswirkungen des akustischen Schleifens auf den Güterverkehrslärm nur marginal sind und somit auf hochbelasteten Güterverkehrsstrecken keine Abhilfe zur Lärmreduktion leisten. Erst durch den flächendeckenden Einsatz lärmarmen Bremssysteme bei Güterwagen könnte das akustische Schienenschleifen seine volle Wirksamkeit entfalten.

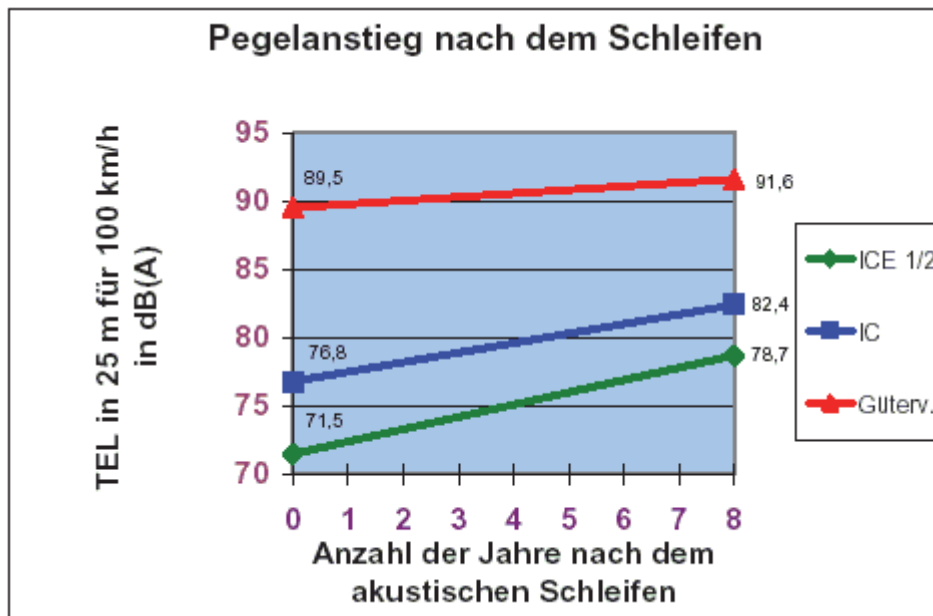


Abbildung 3: Verlauf des Schalldruckpegels nach Fahrzeugkategorien [EuKo 2003]

Mobile Instandhaltungseinheiten (MIE)

Mobile Instandhaltungseinheiten sind Schienenfahrzeuge, welche Arbeiten am Oberbau unter dem Fahrzeug erlauben. Das Sicherheitsdispositiv ist in diesem Fall wesentlich schlanker, denn die Gleisbauarbeiter können benachbarte befahrene Gleise nicht aus Versehen betreten. Die Arbeiten können geschützt vor Niederschlag ausgeführt werden, und durch die vorhandene Beleuchtung ist eine hohe Qualität der Arbeit gewährleistet. Die Seitenwände der mobilen Instandhaltungseinheiten können ausgefahren werden, ohne das benachbarte Lichtraumprofil zu verletzen. Instandhaltungsarbeiten an Weichen und Gleisdurchschneidungen können so unter geschützten Rahmenbedingungen ausgeführt werden. Durch die Einhausung können auch die Lärmemissionen für die Anrainer reduziert werden. Bisher waren mobile Instandhaltungseinheiten nur versuchsweise auf dem Schweizer Netz im Einsatz.

Akkubetriebene Werkzeuge

Durch die steigende industrielle Fertigung von Batterien ist auch deren Preis in den letzten Jahren erheblich gesunken. Zusätzlich werden diese durch eine höhere Energiedichte wesentlich kompakter, so dass seit wenigen Jahren auch viele Gleisbaumaschinen wie Handstopfaggregate, Schraubmaschinen und Schienenbohrmaschinen auch in elektrischen Versionen angeboten werden. Dies reduziert nicht nur die Lärmemission sondern verbessert zugleich die Arbeitsbedingungen für die Gleisbauarbeiter. Es ist davon auszugehen, dass sich zukünftig die Angebotspalette erweitern wird.

2.3 Rollmaterial

Im Folgenden wird eine Übersicht über fahrzeugseitige Maßnahmen zur Minderung der Schallemission von Schienenfahrzeugen gegeben. Das Kapitel wird unterteilt in Maßnahmen am Fahrwerk zur Minderung von Roll- und Kurvengeräuschen und Maßnahmen an Lokomotiven und Triebfahrzeugen zur Minderung von Antriebs- und Stillstandgeräuschen.

Das Rollgeräusch ist bei mittleren Geschwindigkeiten die dominierende Geräuschkomponente. In engen Gleisbögen kommen Kurvengeräusche hinzu. Hier wird besonders das tonale Kurvenkreischen als störend empfunden. Im Bereich niedriger Geschwindigkeiten dominiert das Antriebsgeräusch. Je leiser das Rollgeräusch durch Massnahmen am Fahrwerk wird, desto stärker tritt das Antriebsgeräusch in den Vordergrund. Bei höheren Geschwindigkeiten wird das Vorbeifahrgeräusch vom aerodynamischen Geräusch dominiert. Weitere Geräuscharten im Schienenverkehr sind Brems-, Anfahr- (Schlupf), Rangier- und Abstell- / Stillstandgeräusche.

2.3.1 Massnahmen am Fahrwerk

Das Rollgeräusch ist vor allem bei Güterzügen problematisch. Diese sind deutlich lauter als Personenzüge. Aus diesem Grund liegt der Fokus dieses Kapitels auf Massnahmen zur Reduktion des Rollgeräusches bei Güterwagen. Auf Besonderheiten im Personenverkehr wird am Ende dieses Kapitels eingegangen. Die vorgestellten Minderungsmassnahmen gelten vom Prinzip her für alle Arten von Schienenfahrzeugen.

Das Rollgeräusch entsteht durch Wechselkräfte, die beim Rollen des Rades auf der Schiene wirken und das Schienenfahrzeug und die Infrastruktur zu Schwingungen anregen. Das Rollgeräusch setzt sich im Wesentlichen aus der Schallabstrahlung von Rad, Schiene und Schwelle zusammen. Aus diesem Zusammenhang wird deutlich, dass fahrzeugseitige Massnahmen nur die vom Rad abgestrahlte Komponente des Rollgeräusches mindern, sofern die Massnahme nicht in den Anregungsprozess eingreift. Für den Fall, dass die infrastrukturseitige Komponente das Rollgeräusch dominiert, sind Massnahmen am Fahrzeug weniger wirkungsvoll und umgekehrt. Daran wird auch die Schwierigkeit der Angabe des Minderungspotentials einer Massnahme deutlich, die nur unter den Randbedingungen der Messung bzw. Berechnung gültig ist und deshalb bei verschiedenen Untersuchungen schwanken kann. Die Radabstrahlung dominiert das Rollgeräusch im höheren Frequenzbereich ab etwa 1 kHz. In diesem Bereich ist das Ohr besonders empfindlich.

Es gibt verschiedene Ansatzpunkte zur Minderung des Rollgeräusches, die im Folgenden vorgestellt werden. Zum einen kann die Schwingungsanregung minimiert werden. Die Anre-

gung des Rollgeräusches erfolgt im Wesentlichen durch die kombinierte Rauheit von Rad und Schiene. Die Aufrauung der Radlaufläche wird vom Bremssystem beeinflusst. Ein weiterer fahrzeugseitiger Anregungsmechanismus sind Radformfehler wie Flachstellen. Unter dem Begriff schalloptimierte Radbauform sind verschiedene Möglichkeiten zur akustischen Optimierung des Rades zusammengefasst. Sie beeinflussen die Anregbarkeit des Rades, die Schwingformen und die Schallabstrahlung. Darunter fallen die Radgeometrie, der Raddurchmesser und Radwerkstoffe. Eine weitere Minderungsmöglichkeit ist die Reduzierung der Radschwingungsamplitude durch Erhöhung der Dämpfung des Rades durch Raddämpfer. Die Erhöhung der Dämpfung ist auch durch Aufbringen einer dämpfenden Beschichtung möglich. Schließlich kann der abgestrahlte Schall an der Ausbreitung gehindert werden. Dieses ist mit Rad- und Drehgestellschürzen möglich. Die Übertragung von Körperschall in den Aufbau wird durch Entkopplung des Drehgestells vom Aufbau reduziert. Durch ein optimiertes Güterwagendrehgestell, welches mehrere dieser Maßnahmen kombiniert, ist eine deutliche Reduktion des Rollgeräusches möglich.

Bremssystem

Das Bremssystem hat Einfluss auf die Aufrauung der Radlaufläche und somit auf die Schwingungsanregung. Grauguss-Bremsklötze rauhen die Laufläche stärker auf als K- und LL-Sohlen oder Scheibenbremsen. Der Ersatz von GG-Bremssohlen durch K- oder LL-Sohlen führt auf glatten Schienen zu einer Rollgeräuschminderung von ca. 10 dB [BMVBS (2013)]. Jedoch erhöht sich durch den Austausch der Bremsklötze der Radverschleiß erheblich. Im Projekt EuropeTrain wurde eine Erhöhung des Radverschleißes durch LL-Sohlen um bis zu 260 % ermittelt [UIC B 126/RP 43 (2013)].

Der Ersatz von GG-Bremssohlen durch Scheibenbremsen führt auf glatten Schienen ebenfalls zu einer Rollgeräuschminderung von ca. 10 dB [Lutzenberger, S und Gutmann, C (2013)]. Da die Scheibenbremse nicht auf die Radlaufläche wirkt, tritt kein erhöhter Verschleiß auf. Eine weitere Verminderung des Rollgeräusches kann bei Verwendung von Scheibenbremsen durch eine optimierte Radbauform erreicht werden (siehe Unterpunkt **Schalloptimiertes Rad**, Seite 19). Ein weiterer Vorteil der Scheibenbremse gegenüber Klotzbremsen besteht darin, dass kein klapperndes Bremsgestänge vorhanden ist. Scheibenbremsen können als Radscheibenbremsen oder als Wellenbremsscheibe ausgeführt sein. Ein Vorteil von Radscheibenbremsen ist, dass sie bei geeigneter Anregung durch die Fügestellendämpfung das Rad zusätzlich dämpfen können und dadurch eine zusätzliche Minderung des Rollgeräusches bewirken können [Wiemers, M (2004)]. Zudem kann aus Lichtraumprofilgründen der Durchmesser der Bremsscheibe bei Radscheibenbremsen größer als bei Wellenbremsscheiben gewählt werden.

Bei Klotzbremsen stellt das Klappern des Bremsgestänges bei niedrigen Geschwindigkeiten eine zusätzliche Geräuschquelle dar. Bei hohen Geschwindigkeiten wird es durch das zunehmende Rollgeräusch überdeckt. Durch Vermeidung des Klapperns ist bei niedrigen Geschwindigkeiten ein Schallminderungspotential von bis zu 2 dB möglich.

Das Klappern kann durch Verwendung von Klotzbremseinheiten ohne Bremsgestänge verhindert werden. Solche Systeme sind beispielsweise die CFCB von Knorr-Bremse oder die BFCB von Faiveley Transport.

Eine andere Möglichkeit zur Reduktion des Klapperns ist die Verwendung von Kunststoffbuchsen im Bremsgestänge. Diese besitzen eine höhere Dämpfung und ein geringeres Gewicht als Metallbuchsen [Faigle (2014)].

Vermeidung von Flachstellen und Instandhaltung der Räder

Durch Fahrflächenfehler wie Flachstellen werden Fahrzeug und Infrastruktur zu Schwingungen angeregt. Eine akustisch relevante Flachstelle erzeugt bei der Fahrt ein geschwindigkeitsabhängiges, schlagendes Geräusch. Bei rauen Rädern wird diese Geräuschkomponente weitgehend durch das laute Rollgeräusch überdeckt. Bei glatten Rädern auf glatter Schiene kann das von Flachstellen verursachte Geräusch in den Vordergrund treten. Flachstellen können beim Blockieren der Räder bei zu starker Bremsung sowie bei Hemmschuhbremsung in Rangierbahnhöfen entstehen. Bislang werden Flachstellen aus Sicherheitsgründen, nicht aber aus akustischen Gründen entfernt. Zur akustischen Wirkung von Flachstellen, z. B. zum Zusammenhang zwischen Flachstellenlänge und Schallemission, besteht noch Untersuchungsbedarf.

Das Entstehen von Flachstellen kann durch Verwendung eines Gleitschutzes (im Personenverkehrs üblich, bei Güterwagen nicht) vermindert werden. Beim Rangierbetrieb kann das Entstehen von Flachstellen durch Schmierung der Hemmschuhe oder zweiseitige Hemmschuhe vermindert werden.

Bestehende, akustisch relevante Flachstellen können durch Abdrehen der Räder entfernt werden. Um diese Maßnahme möglichst frühzeitig nah dem Entstehen umsetzen zu können, bedarf es eines Monitoring-Systems zur Erkennung akustisch relevanter Flachstellen.

Schalloptimiertes Rad

Durch ein schalloptimiertes Rad kann an mehreren Stellen in den Schallentstehungsprozess eingegriffen werden. Die Anregbarkeit des Rades kann vermindert werden, beispielsweise durch Verschiebung der Radmoden in einen akustisch weniger relevanten Frequenzbereich. Auch eine Verdickung des Steges vermindert die Anregbarkeit des Rades durch Erhöhung der

Steifigkeit [Wiemers, M (2004)]. Es ist auch möglich, die Schallabstrahlung zu reduzieren, beispielsweise durch perforierte Radscheiben oder Speichenräder.

Bei klotzgebremsten Rädern, wie sie bei Güterwagen die Regel sind, tritt beim Bremsen eine hohe thermische Belastung des Radkranzes auf. Um dieser Belastung langfristig ohne Nabenaufweitung standhalten zu können und ein Ausweichen des Rades zu vermeiden, sind die Räder glockenförmig. Diese Form ist jedoch in Bezug auf die Schallabstrahlung nicht ideal. Durch einen symmetrischen Radquerschnitt (gerader Steg) können die Radialmoden, die durch die im Rad/Schiene-Kontakt wirkenden Kräfte leicht angeregt werden können, von den gut schallabstrahlenden Axialmoden entkoppelt werden. Eine in dieser Hinsicht optimierte Radgeometrie ist bei der Verwendung von Scheibenbremsen möglich.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Schallabstrahlung vom Rad ist die Reduzierung der abstrahlenden Oberfläche durch Einsatz kleinerer Räder. Dieser Effekt wird durch den ungünstigeren Kontaktfilter aufgrund der kleineren Berührfläche etwas vermindert [Lutzenberger, S und Gutmann, C (2013)]. Bisher konnten kleinere Räder wegen des UIC-Merkblattes 510 bei hohen Achslasten nicht eingesetzt werden. In der nun geltenden TSI-Wagon (2013) ist ein kleinerer Raddurchmesser jedoch erlaubt. Als problematisch kann sich bei kleineren Rädern der erhöhte Verschleiß durch die größere Rotationsgeschwindigkeit sowie die stärkere Neigung zur Riffelbildung auf der Lauffläche erweisen. Um eine Zunahme des Rollgeräusches im Laufe der Zeit aufgrund der stärkeren Polygonisierung zu vermeiden, ist eine akustische Kontrolle der Räder und ggf. eine häufigere Reprofilierung notwendig.

Kleinere Güterwagenräder werden beispielsweise bei der „rollenden Landstraße“ (ROLA) eingesetzt. Hierbei handelt es sich um Lastwagentransportfahrzeuge mit einem Raddurchmesser von 360 mm. Die schweizerischen Monitoring-Stationen zeigen eine breite Streuung des Vorbeifahrtpegels der ROLA-Fahrzeuge zwischen 76 und 96 dB(A), es existieren also sowohl leise als auch sehr laute Fahrzeuge [Attinger, R (2013)].

Raddämpfer

Stahl weist nur eine sehr geringe Dämpfung auf. Daher wurden verschiedene Systeme von diversen Herstellern (z.B. Schrey & Veit, GHH-Radsatz GmbH, Bochumer Verein (BVV), Luchini RS) zur Dämpfung der Radschwingungen entwickelt. Unter dem Begriff Raddämpfer werden hier Radschallabsorber, Dämpfungsringe, Radkappenabsorber und Bedämpfung durch constrained layer (= eingezwängte Schicht) zusammengefasst. Raddämpfer entziehen dem schwingenden System durch Dissipation und/oder Reibung Energie. Je nach Bauform dämpfen Raddämpfer die Radschwingungen in radialer und/oder axialer Richtung. Je nach System gibt es verschiedene Befestigungsarten, beispielsweise können Raddämpfer in den

Radkranz geklemmt oder am Radsteg verschraubt werden. Bei klotzgebremsten Rädern können Raddämpfer, deren Wirkung auf Dämpfung durch Polymere beruht, nicht wirkungsvoll eingesetzt werden. Die hohe thermische Belastung beim Bremsen beschädigt die Polymere. Es existieren Systeme ohne Polymere, beispielsweise das Hypno®damping System von Lucchini RS, die auch für klotzgebremste Güterwagen geeignet sind [Lucchini RS (2015)].

Das Minderungspotential von Raddämpfern zur Reduktion des Rollgeräusches ist vom Radzustand und vom Oberbau abhängig. Der Einsatz von Raddämpfern ist vor allem lohnenswert, wenn das Rollgeräusch von der Radabstrahlung dominiert wird. Das mittlere Potential zur Minderung des Rollgeräusches durch Raddämpfer wird auf ca. 2,5 dB(A) geschätzt. Zusätzlich können Raddämpfer Kurvenkreischen reduzieren. Hier kann eine Minderung von 10-15 dB(A) erreicht werden. Auch das Kreischen bei Balkengleisbremsen im Güterbahnhof wird durch Raddämpfer reduziert. Im Güterverkehr werden Raddämpfer bislang nur vereinzelt eingesetzt, beispielsweise bei den Wagen der RWE Kohlebahn.

Dämpfende Beschichtung / Anstrich

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Dämpfung von Rad und/oder Drehgestell ist das Auftragen einer dämpfenden Beschichtung. Ein Beispiel für eine lärmmindernde Beschichtung von Güterwagenradsätzen ist die Verschleißschutzbeschichtung „RELEST® Protect Wheel“ der BASF Coatings GmbH. Die Schallminderung liegt laut BASF bei 2,4 dB. Ein weiteres Beispiel ist die viskoelastische Beschichtung „Syope“ von Lucchini RS [Lucchini RS (2015)].



Abbildung 4: Beispiel für eine Radsatzbeschichtung Quelle: BASF-Coatings

Im Projekt Low-Noise-Train der SBB und ÖBB wurde unter anderem die Wirkung eines Antiröhnanstriches bei einem Güterwagendrehgestell untersucht. Beim Versuchszug konnte durch die Drehgestellbeschichtung nur eine leichte, nicht signifikante Minderung des Rollgeräusches erzielt werden [Barth, M und Presle, G (2009)]. Es besteht Untersuchungsbedarf, ob

durch Verwendung einer anderen Drehgestellbeschichtung eine größere Minderung des Rollgeräusches erzielt werden kann.

Das Aufbringen einer dämpfenden Beschichtung ist eine einfache Maßnahme zur Reduktion des Rollgeräusches. Bei Bestandsfahrzeugen kann sie beispielsweise im Zuge der vollständigen Revision durchgeführt werden. Für die Rissprüfung, die bei Güterwagen nach EVIC-Richtlinien alle 4-6 Jahre durchgeführt werden muss, ist eine Entfernung der Beschichtung notwendig. Das Entfernen kann mittels Sandstrahlung erfolgen, anschließend muss die Beschichtung neu aufgebracht werden. Um das aufwändige Entfernen der Beschichtung bei der Rissprüfung von der Radsatzwelle zu umgehen, könnten hohlgebohrte Radsatzwellen zur Rissprüfung mittels Ultraschall wie im Hochgeschwindigkeitsverkehr eingesetzt werden.

Schallschürzen am Radsatz / Drehgestell

Rad- und Drehgestellschürzen schirmen das Rad bzw. Drehgestell ab und dämmen den abgestrahlten Luftschall. Es ist darauf zu achten, dass die Schürzen nicht selbst als Schallquellen wirken, indem sie zu Schwingungen angeregt werden und Schall abstrahlen. Dieser Effekt kann durch elastische Lagerung der Schürzen und Entdröhnungsmaterial verhindert werden. Schallschürzen ohne absorbierende Auskleidung reflektieren den Schall und lenken ihn in das absorbierende Schotterbett um. Eine absorbierende Auskleidung der Schürzen, die dem Schallfeld zusätzlich Energie entzieht, ist empfehlenswert. Um eine gute Abschirmwirkung zu erzielen, ist auf einen möglichst kleinen Luftspalt zwischen Schürze und Schienenkopf zu achten. Deshalb ist eine Kombination von Schallschürzen mit einer niedrigen Schallschutzwand (nSSW) sehr wirkungsvoll.

Schallschürzen am Radsatz oder Drehgestell wurden in mehreren Forschungsprojekten getestet, bislang sind aber keine zugelassenen Schallschürzen bekannt. Kritische Punkte bei der Zulassung sind die Heißläuferdetektion, der Brandschutz und die Einhaltung des Lichtraumprofils. Auch die Wintertauglichkeit muss gewährleistet sein. Durch Schallschürzen wird zudem die Bremsprobe erschwert. Die Detektion sicherheitsrelevanter Eigenschaften beim Einsatz von Schallschürzen könnte durch ein modernes Diagnosesystem, beispielsweise Cargo CBM, ermöglicht werden.

Die Minderungswirkung einer Schallschürze am Radsatz oder Drehgestell ohne absorbierende Auskleidung beträgt ca. 1-2 dB [Barth, M und Presle, G (2009); Lutzenberger, S und Gutmann, C (2013); Hemsworth, B und Jones R R K (2000)]. Werden die Schallschürzen absorbierend ausgekleidet, ist theoretisch ein zusätzlicher Minderungseffekt zu erwarten. Durch Kombination von Schallschürzen mit niedrigen Schallschutzwänden konnte in Abhängigkeit von der Fahrtgeschwindigkeit eine Minderung des Maximalpegels in 25 m Entfernung von

bis zu 8 dB(A) erzielt werden [Jones, C J C und Hardy, A E J und Jones R R K et al. (1996)]. Die Wirkung der Schallschürze allein wird in dieser Quelle mit 5 dB(A) angegeben. Die theoretisch mögliche Minderung einer optimierten Konstruktion von Schallschürze und nSSW mit schallweichen Oberflächen wurde zu 10-18 dB(A) errechnet [Johannsen, K (2005)].

Optimiertes Güterwagendrehgestell

Das derzeit standardmäßig im Güterverkehr eingesetzte Y25-Drehgestell wurde jahrzehntelang nur minimal weiterentwickelt. Für Neuwagen empfiehlt es sich, ein neues, dem heutigen Stand der Technik entsprechendes, optimiertes Güterwagendrehgestell zu entwickeln und einzusetzen. Mit einem optimierten Drehgestell ließe sich eine erhebliche Lärminderung erreichen. Zusätzlich kann ein optimiertes Drehgestell zu mehr Energieeffizienz und Verschleißreduktion durch besseres Laufverhalten beitragen.

Ein Ansatzpunkt zur Optimierung ist die Primärfederung des Drehgestells. Das Y25-Drehgestell besitzt eine lastabhängige Dämpfung. Beim LeiLa-Drehgestell wurde ein hydraulischer Dämpfer und eine Gummifeder eingesetzt. Von Contitech wurde die Gigabox, eine viskoelastische Federung, entwickelt. Die Gigabox besteht aus Gummifedern mit hydraulischer Dämpfung und einer Kegelrollenlagereinheit. Sie ermöglicht eine bessere radiale Einstellbarkeit der Radsätze im Bogen, wodurch zusätzlich das Kurvenkreischen gemindert wird. In Zusammenarbeit mit Tatravagonka wurde das ASB-Drehgestell (Advanced Suspension Bogie) entwickelt, wo die Gigabox eingesetzt wurde. Das Vorbeifahrgeräusch ist bei diesem Drehgestell um 2 dB(A) minimiert [Kure, G; Skiller, J; et al. (2007)]. Die Gigabox ist jedoch nicht zugelassen. Eine bessere radiale Einstellbarkeit der Radsätze im Bogen kann auch durch Kreuzanker erreicht werden, wie sie beim LeiLa-Drehgestell und beim TVP 2007 von Tatravagonka Poprad verwendet werden. Weitere optimierte Güterwagendrehgestelle sind das DRRS25L von Waggonbau Niesky, das LN25 von Axiom Rail, das Y27LPG von Transtec Vetschau und das RC25NT von ELH.



Abbildung 5: Alternative Radsatzlagerung und -führung: Gigabox; Quelle: ContiTech

Besonderheiten im Personenverkehr

Das von Personenzügen verursachte Rollgeräusch stellt im Vergleich zum erheblich lauterem Rollgeräusch von Güterwagen ein etwas untergeordnetes Problem dar. Im Zusammenhang mit Personenverkehr beklagen Anwohner von Bahnstrecken mit engen Gleisbögen sich häufig über das Kurvenkreischen. Kurvenkreischen wird aufgrund seines tonalen Charakters und der hohen Lautstärke als besonders störend empfunden. Kurvenkreischen tritt vorwiegend bei Gleisbogenradien $R < 500$ m auf, bei der Straßenbahn bei $R < 200$ m [Krüger, F (2013)].

Die Ursache von Kurvenkreischen ist ein periodisches Ruckgleiten (Stick/Slip) der Radlauf­fläche auf der Schiene beim Befahren enger Gleisbögen. Es tritt vor allem am vorlaufenden, bogeninneren Rad auf. Das bogenäußere Rad wird durch den Spurkranz zwangsgeführt, sodass es dort zu keinem Ruckgleiten kommt. Durch das Ruckgleiten werden das Rad und die Schiene zu axialen Biegeeigenschwingungen angeregt. Die abgestrahlten Frequenzen liegen in der Regel zwischen 1,2 und 4 kHz [Krüger, F (2013)].

Massnahmen zur Minderung des Kurvenkreischens können entweder die Ursache beseitigen (primäre Massnahmen) oder das Kreischgeräusch mindern (sekundäre Massnahmen). Primäre Massnahmen sind den sekundären vorzuziehen. Am Rollmaterial können radial einstellende Radsätze als primäre Massnahme gegen Kurvenkreischen eingesetzt werden. Durch die Einstellung des Radsatzes im Bogen werden große Anlaufwinkel zwischen Rad und Schiene und damit das Ruckgleiten vermieden. Eine sekundäre Massnahme stellen Raddämpfer dar. Diese müssen auf die axialen Biegeeigenschwingungen des Rades abgestimmt sein. Durch den Radverschleiß ändert sich die Eigenfrequenz des Rades über die Zeit, so dass Raddämpfer außerdem und ausreichend breitbandig sein müssen.

2.3.2 Maßnahmen an Lokomotiven und Triebfahrzeugen

Bei mittleren Geschwindigkeiten ist auch bei Lokomotiven und Triebfahrzeugen das Rollgeräusch die dominierende Geräuschkomponente. Daneben existiert aber eine Reihe weiterer Schallquellen, die vor allem im Stillstand und bei niedrigen Geschwindigkeiten dominieren. Zu diesen Schallquellen zählen Getriebe, Motor, Umrichter, Generator, Lüftungsaggregate, Kompressor und Klimaanlage. Auch nicht angetriebene Wagen können schallemittierende Aggregate besitzen wie Klima- oder Kühlaggregate. Die Schallemission der oben genannten Schallquellen ist meist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Sie enthält häufig tonale Komponenten (z. B. Lüfter, Getriebe), die als besonders störend empfunden werden. Auch impulshaltige Geräusche wie das Ausblasen des Kondensates bei der Drucklufterzeugung werden als besonders störend wahrgenommen.

Es gibt verschiedene Ansätze zur Minderung der Aggregatgeräusche. Die Aggregatgehäuse sollten derart gestaltet sein, dass die Schallabstrahlung möglichst gering ist. Die Schallabstrahlung schwingender Flächen kann beispielsweise durch Verwendung von Lochplatten verringert werden. Durch elastische Lagerung der Aggregate kann die Übertragung von Körperschall reduziert werden. Dabei ist auf die Vermeidung von Körperschallbrücken, wie sie beispielsweise schwingende Schläuche darstellen, durch Entkopplung zu achten. Weitere Möglichkeiten zur Schallminderung sind die Verwendung von Absorptionsmaterialien, der Einbau von Schalldämpfern und die Kapselung von Aggregaten. Durch das Einbringen von absorbierenden Materialien wird dem Schallfeld Energie entzogen (Schalldämpfung). Die Verwendung absorbierender Materialien ist besonders an Orten mit hohen Schalldruckpegeln empfehlenswert, beispielsweise im Motorraum. Im Schienenverkehr dürfen die absorbierenden Materialien nicht anfällig für Verschmutzungen sein und müssen die Brandschutzanforderungen einhalten. Durch Kapselung von Aggregaten wird die Ausbreitung des abgestrahlten Luftschalls behindert (Schalldämmung). Es empfiehlt sich Luftschalldämmung mit Luftschalldämpfung zu verbinden. Sowohl die Dämmung als auch die Dämpfung von Luftschall wirken vor allem im höherfrequenten Bereich. Zur Reduktion tiefer Frequenzen ist in der Regel ein großer Bauraum notwendig, der nur selten zur Verfügung steht. Eine Möglichkeit zur Dämpfung tiefer Frequenzen bei kleinem Bauraum stellen Spiralschalldämpfer (Luftführung in einer Blechspirale) dar, wie sie beim Umbau der Diesellokomotive Blue Tiger der Haveländischen Eisenbahn verwendet wurden [Hecht, M und Czolbe, C (2008)]. Ein anderer Ansatz beruht auf der Erzeugung eines entgegengesetzten Schallfeldes durch eine sekundäre Schallquelle (Antischall, Active Noise Cancellation). In der Praxis ist Antischall vor allem für die Minderung tiefer Frequenzen einsetzbar (große Wellenlängen im Vergleich zur Schallquellenabmessung) und bei kleinen Volumina und gut nachbildbaren Schallfeldern z. B. in Kanälen und Rohren [Möser, M (2012)]. Bei höheren Frequenzen ist nur die Beruhigung

kleiner Raumgebiete möglich, wie beispielsweise bei aktiven Gehörschützern. In Kanälen können sich bei tiefen Frequenzen nur ebene Wellen ausbreiten. Diese lassen sich gut mit Antischall mindern, was bei aktiven Schalldämpfern genutzt wird. Besonders wirkungsvoll ist es, in den Schallentstehungsprozess einzugreifen und die Schallquellen unter akustischen Gesichtspunkten konstruktiv zu optimieren. Dabei ist nicht zwingend eine deutliche Minderung des über alle Frequenzen gemittelten Schalldruckpegels erforderlich. Durch Reduktion der Tonhaltigkeit und / oder Impulshaltigkeit eines Geräusches kann die Belästigung wirkungsvoll gemindert werden. Es existieren beispielsweise schalloptimierte Lüfter, Getriebe und Kompressoren, die im Schienenverkehr eingesetzt werden können. Bei abgestellten Fahrzeugen wird die volle Leistung vieler Aggregate nicht benötigt. Hier bietet sich zur Schallreduktion ein schalloptimierter Betrieb der Aggregate an, der gleichzeitig den Energieverbrauch senkt. Beispielsweise können die Lüfter bei reduzierter Drehzahl betrieben werden, die Klimaanlage nur bei Über-/Unterschreiten bestimmter Temperaturgrenzen eingeschaltet werden und der Kompressordruck kann minimiert werden [Isert, N und Lutzenberger, S (2014)].

Für die Minderung der Anfahr- und Abstell-/Stillstandgeräusche ist es entscheidend, die dominierende(n) Schallquelle(n) zu identifizieren. Die dominierende Schallquelle variiert je nach Fahrzeugkonstruktion und Betriebszustand (Anfahrt, Beharrung, Bogenfahrt, Bremsen, Stillstand), weshalb ein einfaches Rezept zur Minimierung der Gesamtschallemission nicht möglich ist. Zur Unterstützung der akustischen Optimierung von Lokomotiven und Triebfahrzeugen hilft ein konstruktionsbegleitendes Akustikmanagement. Durch konsequentes Anwenden eines Akustikmanagements während der Herstellung, könnte eine erhebliche Schallminderung zum geringstmöglichen Preis erzielt werden. Der Einbau schallmindernder Maßnahmen nach Fertigstellung des Fahrzeuges ist immer teurer.

Im Folgenden wird eine Auswahl von Möglichkeiten zur Minderung der Schallemission der wichtigsten Quellen von Lokomotiven und Triebfahrzeugen vorgestellt. Dabei wird besonders auf Möglichkeiten eingegangen, die noch nicht standardmäßig eingesetzt werden.

Lüftungs- und Kühlaggregate

Triebfahrzeuge müssen intensiv gekühlt werden. Elektrische Fahrzeuge haben einen Kühlluftdurchsatz von ca. $3 \text{ m}^3/(\text{sMW})$ und Dieselfahrzeuge von ca. $30 \text{ m}^3/(\text{sMW})$. Lüftungs- und Kühlaggregate werden beispielsweise für Motoren, Generatoren, Transformatoren, Hilfsantriebe und Batterien eingesetzt. Relevante Geräuschkomponenten sind der Ventilator (Strömungsgeräusche und Schaufeldrehklang) sowie das Ansaugen und Ausblasen der Luft.

Im Projekt EcoQuest [Voith (2012)] wurde ein schalloptimierter Axialventilator entwickelt. Durch Reduzierung des Laufraddurchmessers und Optimierung der Schaufelprofile und –

geometrie wurde eine Minderung des spezifischen Gesamtschallpegels um 6 dB(A) und des Pegels der Schaufelpassierfrequenz um 10 dB(A) erreicht. Durch Optimierung des Kühlsystems (z. B. Lüfterregelung) wurde eine Schallminderung von 3 dB(A) erzielt. Das optimierte Kühlsystem mit zusätzlichen passiven Schalldämpfern am Kühlgitter wurde in der Prototypenlokomotive Gravita 15L BB eingebaut. In Fahr- und Stillstandsversuchen wurde durch die passiven Massnahmen eine Reduktion von 3 dB(A) erreicht. Durch den optimierten Ventilator konnte eine weitere Minderung um bis zu 3 dB(A) erreicht werden. Gleichzeitig zur Geräuschminderung ist das entwickelte Kühlsystem energiesparend.

Auch im Rahmen des Forschungsverbundes Leiser Verkehr wurde zur Minderung der Lüftungsgeräusche angetriebener Schienenfahrzeuge geforscht [Michel, U; et al. (2004)]. Durch Verwendung leiser Ventilatoren, schalldämpfender Verkleidung und Kulissenschalldämpfern für das Ansaugen und Ausblasen der Luft konnte der Schallleistungspegel der Kühlanlage eines Triebzuges um 9 dB(A) und der Schallleistungspegel eines Kühlturmes einer elektrischen Lokomotive um 15 dB(A) verringert werden.

Die Schallemission bereits bestehender Lüftungs- und Kühlaggregate kann mittels Schalldämpfung minimiert werden. Ein Beispiel für die erfolgreiche Minderung von Lüftergeräuschen an Diesellokomotiven sind die BlueTiger-Lokomotiven der Havelländischen Eisenbahn [Hecht, M und Czolbe, C (2008)]. Durch den Einsatz von Absorberjalousien am Kühlluftein- und -auslass konnte ein Einfügedämmmass von 8-14 dB(A) im oberen Frequenzbereich erreicht werden. Ein Beispiel für schalloptimierte elektrische Lokomotiven ist die Lok2000-Familie der SBB [Hecht, M und Zogg, H (1995)]. Durch den Einsatz von Absorptionsschalldämpfern konnte das Ventilationsgeräusch im Normpunkt im Stillstand um 10 dB reduziert werden.

Getriebe

Durch Wechselbewegungen beim Zahneingriff werden die Zahnräder zu Körperschall angeregt, der über die Wellen und Lager auf das Getriebegehäuse übertragen und abgestrahlt wird. Getriebegeräusche enthalten bei der Zahneingriffsfrequenz eine tonale Komponente. Sie können bei niedrigen Geschwindigkeiten das Vorbeifahrgeräusch dominieren.

Getriebe können schalloptimiert konstruiert werden. Schallmindernd wirken sich eine Verringerung des Moduls (= Zahngröße) und ein größerer Schrägungswinkel aus. Das Minderungspotential wird auf bis zu 5 dB(A) geschätzt. Bei Neukonstruktionen sollte auf die Verwendung schalloptimierter Getriebe geachtet werden.

Kompressor / Druckluftherzeugung

Kompressorgeräusche sind vor allem im Stillstand relevant. Konventionell werden zur Druckluftherzeugung Kolbenkompressoren eingesetzt. Die Druckluft wird durch Kolbenhiebe erzeugt, wodurch schlagende Geräusche entstehen. Eine weitere Geräuschquelle ist das stark impulshaltige Ausblasen des Kondensates der Lufttrocknung.

Die Kompressorgeräusche können durch Einsatz optimierter Kompressoren vermindert werden. Schraubenkompressoren erzeugen die Druckluft kontinuierlich, wodurch keine schlagenden Geräusche entstehen. Ein Schraubenkompressor kann im Vergleich zu einem Kolbenkompressor einen um bis zu 10 dB(A) geringeren frequenzabhängigen Einzahlschallpegel aufweisen. Über den gesamten Frequenzbereich ergibt sich schätzungsweise eine Minderung um ca. 5 dB(A).

Von Knorr-Bremse wurde ein ölfreier Kolbenkompressor entwickelt, der akustisch und schwingungstechnisch optimiert ist. Er leitet bis zu 65 % weniger Schwingungen in den Wagenkasten ein und ist deutlich leiser als herkömmliche Kompressoren [Knorr-Bremse (ohne Datum)].

Die Geräusche beim Ausblasen des Kondensates können durch den Einsatz von Schalldämpfern reduziert werden.

Drucklufthauptschalter

Beim Betätigen von Drucklufthauptschaltern entsteht ein Funke, der mit Druckluft ausgeblasen wird. Dieser Vorgang ist sehr laut. Das Schaltgeräusch kann durch Kapselung der Drucklufthauptschalter reduziert werden. Eine Alternative ist der Austausch der Drucklufthauptschalter mit Vakuumhauptschaltern, bei denen keine Funkenentstehung auftritt. Bei Neubaufahrzeugen werden aus Kostengründen bereits Vakuumhauptschalter verwendet.

Stromabnehmer

Durch die Umströmung von Stromabnehmern entstehen aerodynamischen Geräusche, die bei hohen Geschwindigkeiten relevant werden. Da sich die Geräuschquelle auf dem Fahrzeugdach befindet, sind mittelhohe Schallschutzwände wirkungslos. In Europa liegt der maximal durch Stromabnehmer erzeugte Schalldruckpegel bei ca. 85 dB(A) in 25 m Entfernung bei einer Geschwindigkeit von 300 km/h [Marshall, T und Fenech, B A und Greer, R (2013)]. Durch aerodynamische Optimierung der Stromabnehmer lässt sich eine Reduktion von 10 dB und mehr erreichen. In Japan ist die akustische Optimierung von Stromabnehmern für den Hochgeschwindigkeitsverkehr ein wichtiges Forschungsthema. Durch Optimierung der Form

und Verwendung poröser Abdeckmaterialien sind um 15-20 dB(A) leisere Stromabnehmer als die aktuell in Europa verwendeten möglich [Ikeda, M und Mitsumoji, T; et al. (2010)].

3 Einflussfaktoren auf die Entwicklung des Bahnverkehrs

3.1 Übersicht

Neben den technischen Entwicklungen (s. Kapitel 2) werden in diesem Kapitel vor allem die wirtschaftlichen, räumlichen, gesellschaftlichen und politischen Faktoren analysiert, wie die folgende Figur zeigt.

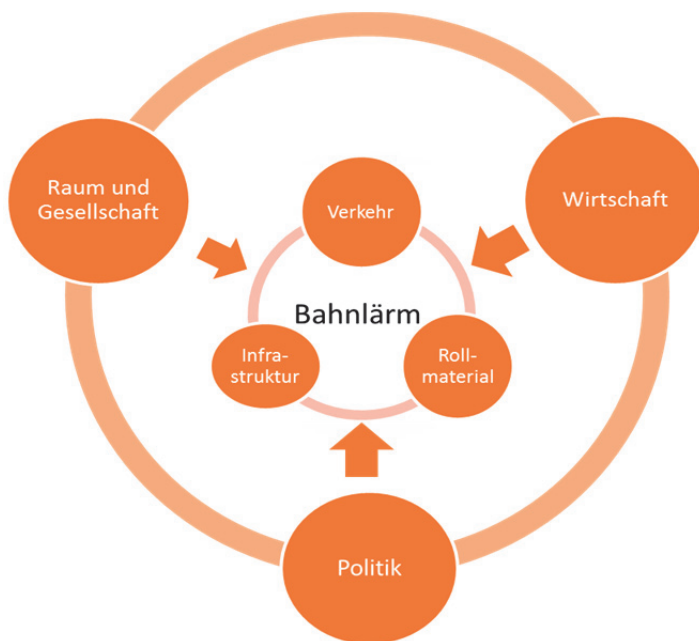


Abbildung 6: Einflussfaktoren Bahnlärm

Zu beachten ist, dass für die Schweiz momentan neue Verkehrsperspektiven bis 2040 in Erarbeitung sind (ARE), entsprechend die offiziellen Prognosen tendenziell veraltet sind. Dies gilt insbesondere für den Personenverkehr. Für den Güterverkehr sind hingegen neue Perspektiven erarbeitet worden (INFRAS/VÖV 2012). Die folgenden Ausführungen basieren auf den zur Verfügung stehenden Grundlagen.

3.2 Entwicklung der Umfeldfaktoren

3.2.1 Bevölkerung, Volkswirtschaft und Transportnachfrage

Im Einflussbereich von Bevölkerung und Erwerbstätigkeit wird von einer weiter steigenden Bevölkerung innerhalb der Schweiz unter anhaltendem Altersstruktureffekt ausgegangen. Güterverkehrsrelevant ist darüber hinaus auch der zu erwartende Anstieg der Weltbevölkerung als Absatzpotenzial für Schweizer Produkte.

Hintergrund der Bevölkerungsentwicklung in der Schweiz ist v. a. die weiter ansteigende Erwerbsbevölkerung (Stichwort Personenfreizügigkeit). Hier besteht ein enger Zusammenhang zur wirtschaftlichen Entwicklung, welche eine solche Erwerbsbevölkerungsentwicklung voraussetzt, um die Wettbewerbsfähigkeit der Schweizer Industrie zu gewährleisten.

Treiber Bevölkerung und Erwerbstätigkeit		
Stichworte	Entwicklungen	Bezug zum Güterverkehr
Werte	liberalisierte Gesellschaft Fokus Soziales und Umwelt	nur indirekt via Konsum
Individualisierung	Abgrenzung individualisierte Produkte	Atomisierung der Endprodukte Flexibilisierung der Vorprodukte
Konsumverhalten	on demand (24/7: rund um die Uhr) steigendes Qualitätsbewusstsein	Schnelligkeit Flexibilität
Lebensstile	Freizeitgesellschaft steigender Wert der Arbeit	nur indirekt via Erwerbstätigkeit

Tabelle 1 *Entwicklungen und Bezug zum Güterverkehr bei den wichtigsten Treibern aus dem Bereich Bevölkerung und Erwerbstätigkeit (Quelle INFRAS 2012)*

Im Bereich der Volkswirtschaft steht u. a. die Frage im Mittelpunkt, wie sich die Globalisierung fortentwickeln wird. Tendenziell erwarten die allgemeinen Prognosen eine Abflachung der Entwicklung. Damit ist insbesondere ein Auslaufen der Konzentrationsprozesse verbunden, d. h. die absatznahe Produktion mit entsprechenden (teilweisen) Rückverlagerungskonsequenzen für Europa rückt vermehrt in den Vordergrund. Dennoch werden die Wertschöpfungstiefen weiter abnehmen, jedoch vermehrt unter kontinentaler Konzentration des räumlichen Bezugs zur gesamten Wertschöpfungskette.

Treiber Volkswirtschaft		
Stichworte	Entwicklungen	Bezug zum Güterverkehr
Globalisierung	absatznahe Produktion abhängig von der Wertschöpfungstiefe	Verstärkung Kontinentalverkehr Vorprodukte weiterhin aus Übersee
Produktionsprozesse	Grundprodukte vs. Endprodukte Bevorratung und Verteilung	Hub and Spoke Systeme Zuverlässigkeit
Wertschöpfungstiefe	fokussiert auf kontinentale Ketten Schweiz: letzte Stufe in der Kette	Schweiz: kaum Veränderungen Güterstruktureffekt (Stückgut statt Massengut)
Rohstoffe	Verteuerung Substitution Versorgungssicherheit	zum Teil Rückgänge Umstellung der Transportvorgänge
Energie	Energieperspektiven Bund Rückgang Bedarf fossiler Brennstoffe ⁴	Aufkommensrückgang (insb. Import) Umstellung der Transportvorgänge
Transportintensitäten	träge bei den Massengütern weiterhin sinkend im Stückgutbereich	dämpfende Wirkung auf wirtschaftliche Entwicklungen

Tabelle 2 *Entwicklungen und Bezug zum Güterverkehr bei den wichtigsten Treibern aus dem Bereich Volkswirtschaft (Quelle INFRAS 2012)*

Daraus lassen sich folgende quantitative Entwicklungen ableiten.

⁴ lt. Energieperspektiven Bund; a. M. Erdölvereinigung

Entwicklung wichtiger Leitdaten			
	ex-post 1995 - 2010	Prognose 2010 - 2020	Prognose 2020 - 2030
Bevölkerung	+0.7% p.a.	+0.7% p.a.	+0.6% p.a.
Erwerbstätige	+0.9% p.a.	+0.4% p.a.	-0.1% p.a.
Produktivität	+0.8% p.a.	+1.0% p.a.	+1.7% p.a.
Bruttoinlandsprodukt	+1.8% p.a.	+1.7% p.a.	+1.6% p.a.
Importe	+4.2% p.a.	+4.7% p.a.	+3.0% p.a.
Exporte	+5.0% p.a.	+4.0% p.a.	+3.1% p.a.

Tabelle 3 *Weitere Entwicklung wichtigster Leitdaten aus den Bereichen Bevölkerung, Erwerbstätigkeit und Volkswirtschaft (INFRAS 2012)*

Im Einflussbereich des Transports ist von zentraler Bedeutung, wie sich die Warenwerte und damit die Transportintensitäten in den einzelnen Produktgruppen entwickeln werden. Die Warenwerte werden auch künftig weiter ansteigen, wenn auch bei abnehmenden spezifischen Warengewichten. Tendenziell sind auch längerfristig weiter sinkende Transportintensitäten zu erwarten, da das Wirtschaftswachstum schneller zunimmt als das zugehörige Aufkommen, jedoch mit warengruppen- und verkehrsartenspezifischen Ausnahmen. Die *Massengütertransporte* insbesondere im Binnenverkehr werden hier eher unveränderte Intensitäten aufweisen bei ebenfalls unveränderten Warenwerten. Eine Ausnahme bilden die Intensitäten der *Stückguttransporte im Sammelgutbereich*, welche durch Konsolidierung, Bündelung und kombinierte Transportprozesse immer noch ansteigen werden.

Der Modalsplit wird geprägt durch eine vermehrte Arbeitsteilung zwischen den Verkehrsträgern auf der Basis intermodaler Angebote. Verkehrspolitisch wird von keiner Verschlechterung in der Grundstimmung gegenüber der Bahn ausgegangen.

Treiber Transport		
Stichworte	Entwicklungen	Bezug zum Güterverkehr
Transportintensitäten	träge bei den Massengütern weiterhin steigend im Stückgutbereich	dämpfende Wirkung auf wirtschaftliche Entwicklungen
Verkehrspolitik	liberalisierte Marktordnung Beibehaltung Regulativ beschränkter Infrastrukturausbau Optimierung Kapazitätsauslastung Förderung Co-Modalität	Produktivitätseffekte Bahn intermodale Transportprozesse begrenzte Strassenkapazitäten
Produktion, Logistik, Technologie	Stückgutcharakteristik Konsolidierung/Bündelung intermodale Angebote/OSS durchgehende Information Green Logistics	intermodale Transportprozesse Zuverlässigkeit vor Schnelligkeit Transportqualität

Tabelle 4 Entwicklungen und Bezug zum Güterverkehr bei den wichtigsten Treibern aus dem Bereich Transport (INFRAS 2012)

Fazit

- Die Bahnnachfrage wird weiter zunehmen,
- Zwischen 2010 bis 2030 ist gemäss den revidierten Verkehrsperspektiven des ARE (2012) mit Wachstumsraten bis zu 50 % der Verkehrsleistung im öffentlichen Personenverkehr zu rechnen,
- Im Schienengüterverkehr (INFRAS 2012) betragen die Wachstumsraten der Tonnenkilometer 35 % für den Binnenverkehr und 39 % für den Import- und Exportverkehr. Der Transitverkehr (in erster Linie alpenquerender Verkehr) hängt stark von den verkehrspolitischen Rahmenbedingungen ab. Gemäss Prognosen des BAV unter Berücksichtigung der Wirkungen von NEAT und 40-Tonnen Korridor betragen die Wachstumsraten im alpenquerenden Verkehr zwischen 2009 und 2030 (Tonnagen, gemäss INFRAS 2011):
 - für Wagenladungsverkehr +50 %
 - für unbegleiteten Kombiverkehr +87 %
 - für ROLA + 39 % (abhängig vom Bedürfnis, die Verlagerungsziele zu erreichen, können die Wachstumsraten hier auch deutlich höher sein).

3.2.2 Verkehrs- und Umweltpolitik

Für den Bahnlärm prägend sind insbesondere die Planungen bezüglich Bahnausbau und entsprechender Umsetzung der Umrüstung des Rollmaterialparks. Folgende Elemente spielen dabei eine besondere Rolle:

Schweiz

- Mit der Annahme der FABI-Vorlage ist die Finanzierung der zukünftigen Infrastrukturausbauten und auch des Lärmsanierungsprogramms Eisenbahnen gesichert.
- Das Ausbauprogramm STEP definiert das Angebotskonzept und damit den Trassenbedarf für den Bahnverkehr bis 2030. Detaillierte Trassenbedürfnisse liegen vor allem für den Güterverkehr vor. Im Personenverkehr spielen auch die Bedürfnisse der Kantone im Regionalverkehr eine wichtige Rolle.
- Das vom Bundesrat 2012 verabschiedete zusätzliche Massnahmenpaket gegen den Eisenbahnlärm hat zu neuen Lärmgrenzwerten für Güterwagen geführt. Damit werden ab 2020 Fahrten mit lärmigen Güterwagen (Grauguss-Bremssohlen) auf dem Schweizer Bahnnetz faktisch verboten. Zusammen mit weiteren Massnahmen erhöht sich die Zahl der Personen, die vor übermässigem Bahnlärm geschützt werden können, von 170'000 auf rund 220'000. Ergänzend hat der Bundesrat folgende Massnahmen beschlossen:
 - Wo besonders viele Personen dem Eisenbahnlärm ausgesetzt sind, sollen Schienenschallabsorber eingesetzt und die Schienen durch Schleifen glatt gehalten werden.
 - Lücken zwischen bestehenden Lärmschutzwänden sollen geschlossen werden, wenn dies die Wirkung deutlich verbessert.
 - Es sollen weitere Stahlbrücken saniert werden.
 - Der Bundesrat will die Entwicklung, Erprobung und Zulassung von Rollmaterial und Infrastrukturkomponenten, die besonders leise sind, finanziell fördern.

EU / Ausland

Basis ist die Richtlinie über Umgebungslärm (2002/49/EG). Im Weissbuch Verkehr 2011 hat die EU den Verkehrslärm als ernstes Problem anerkannt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass 50 % des Schienengüterverkehrs grenzüberschreitend sind, hat die EU auch verschiedene Elemente verstärkt, z. B. Erstellung von Lärmkarten und Aktionsplänen, Einbezug des Lärms bei den Trassenpreisen, Fortentwicklung der Grenzwerte für Waggons (TSI-

Noise), die Erprobung und Zulassung von LL-Sohlen, der Ausbau von ERTMS (Motorbremsen) und die Mitfinanzierung der Nachrüstung von Waggons mit leisen Bremsblocks (bis zu 20 %).

Basis für die Lärmsanierung in Deutschland ist die Richtlinie für die Förderung von Maßnahmen zur Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes. Elemente der Förderung sind:

- Das Pilot- und Innovationsprogramm „Leiser Güterverkehr
- Das Verbundprojekt „Lärmreduzierter Güterverkehr durch innovative Verbundstoff-Bremsklotzsohlen“
- Das lärmabhängige Trassenpreissystem (laTPS)
- Das Konjunkturprogramm II: Erprobung innovativer Techniken
- Das Sonderprogramm Lärmschutz Schiene

Fazit

- Generell hat die politische Sensibilität ggü. Bahnlärm zugenommen. Dies gilt insbesondere für die Anstrengungen, den Güterverkehrslärm zu reduzieren.
- Im Vordergrund steht im internationalen Raum die Umrüstung der Güterwagen auf leise Bremssohlen. Im Vergleich dazu ist die Lärmsanierung der Güterwagen in der Schweiz deutlich weiter fortgeschritten. Bei den SBB ist die Sanierung abgeschlossen, bei den privaten Haltern auf gutem Weg.
- Die Verlagerungspolitik führt dazu, dass die Trassenkonkurrenz zunimmt und deshalb hohe Anforderungen an den Mischbetrieb im Tagesverlauf gestellt werden (Zugfolgen, Geschwindigkeiten, Nachtfahrten).

3.2.3 Entwicklung Infrastruktur und Verkehr

Infrastrukturausbauten

Die folgende Abbildung zeigt die konkret geplanten Infrastrukturausbauten gemäss der Vorlage FABI (BAV 2015). Auf dieser Basis hat das BAV in Zusammenarbeit mit den SBB das Konzept STEP entwickelt.

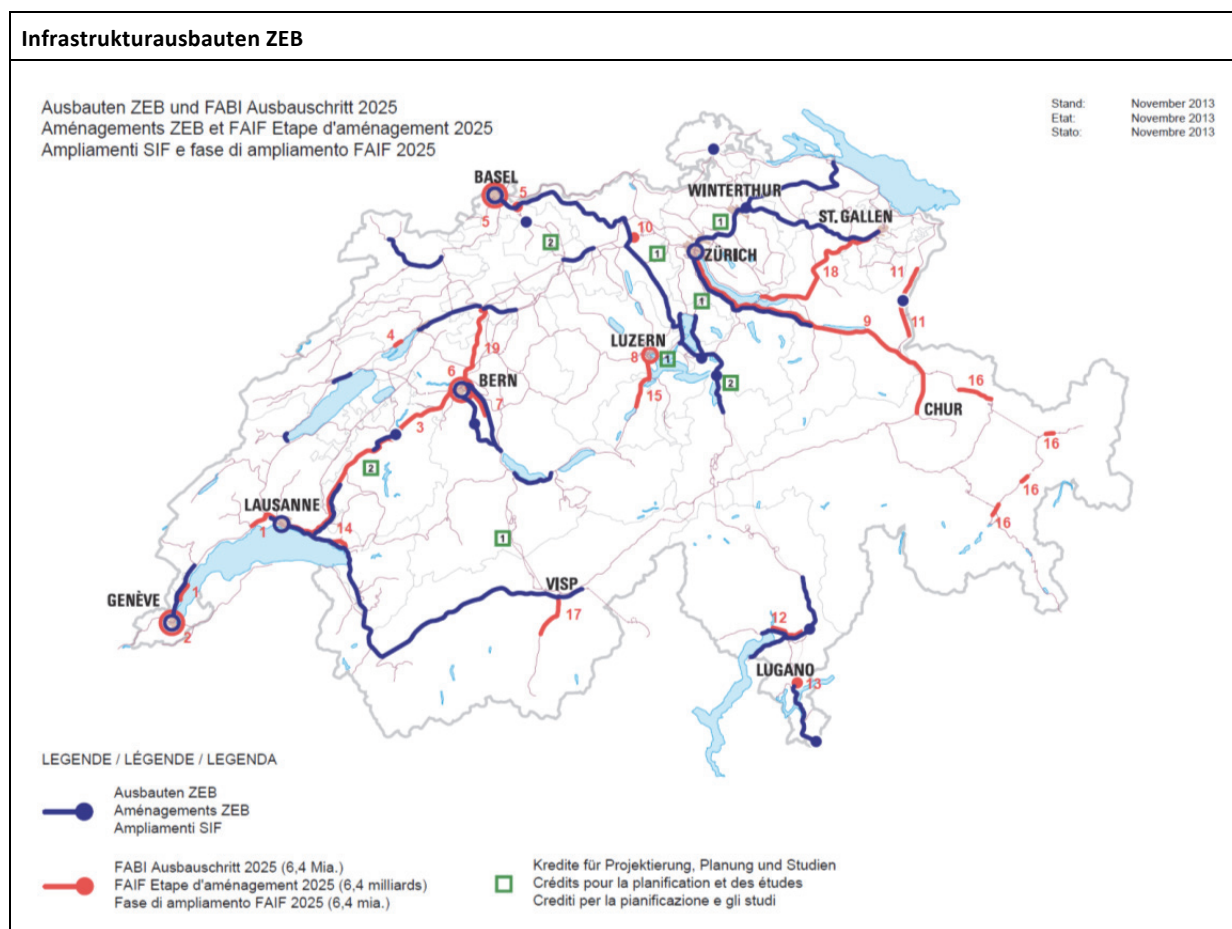


Abbildung 7: Infrastrukturausbauten gemäss FABI/ZEB

Trassen Güterverkehrs⁵

Die Gesamtnachfrage ergibt sich aus der Summe der erforderlichen Transitrassen und der beiden Arten von Binnen-/Import-/ Export-Trassen. Ausgehend von den Prognosen ist folgender Trassenbedarf ermittelt worden.

VÖV-Prognose

Basierend auf den Prognosen von INFRAS/IVT (2012) sind zwei Szenarien untersucht (Trend, verstärkte Verlagerung auf die Schiene) und folgender Bedarf ermittelt worden.

⁵ Für den Personenverkehr liegen keine vergleichbaren Zahlen vor.

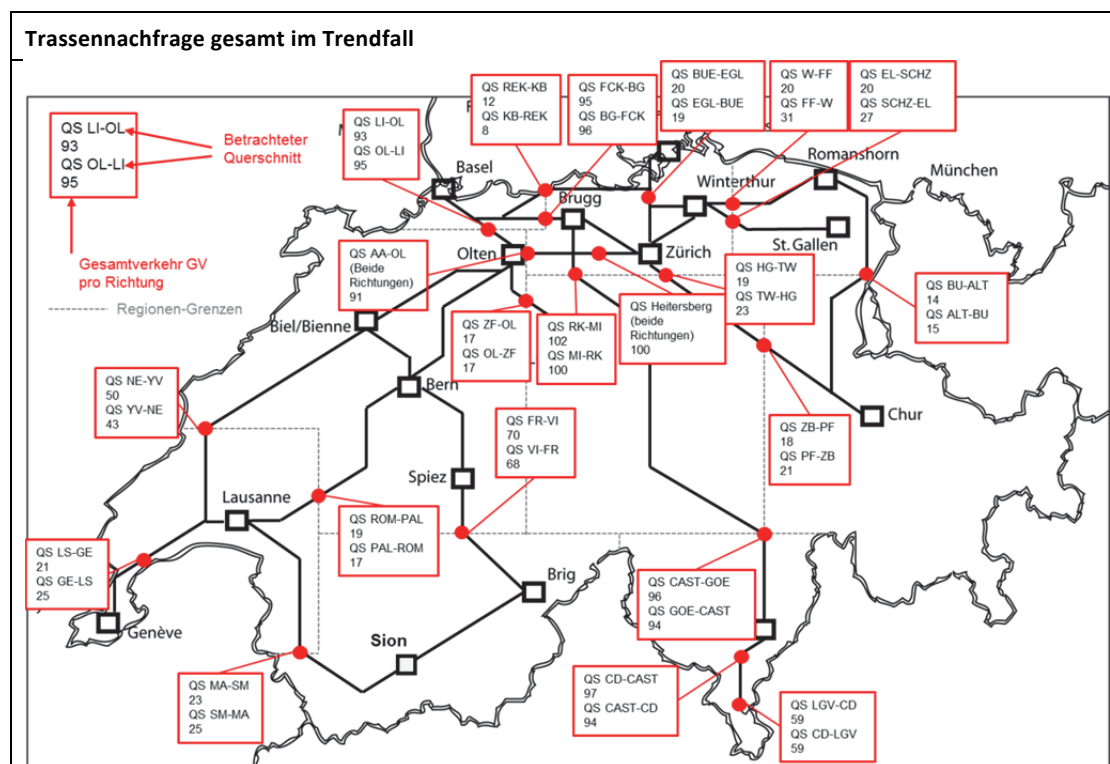


Abbildung 8: Trassennachfrage im Jahr 2030 pro Tag für Binnen-/Import-/Export- und Transit-Verkehre im Trendfall

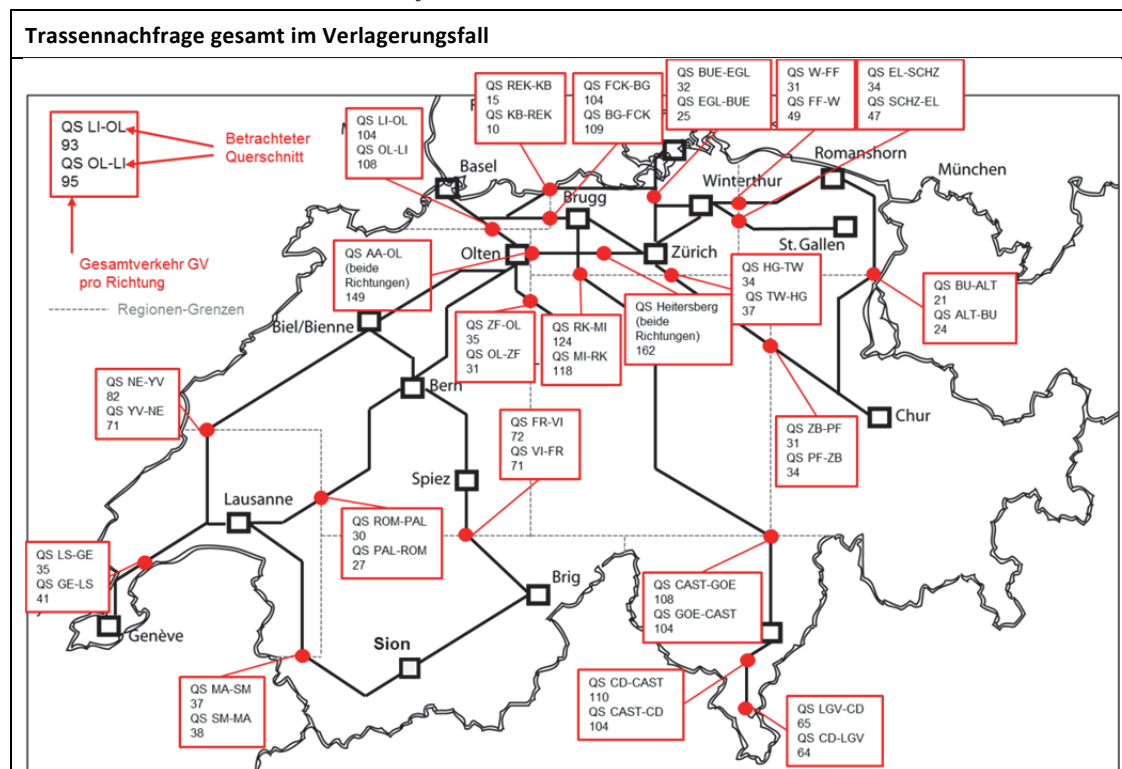


Abbildung 9: Trassennachfrage im Jahr 2030 pro Tag für Binnen-/Import-/Export- und Transit-Verkehre im Verlagerungsfall

STEP Angebotskonzept

Die Analysen von STEP gehen von folgendem Trassenangebot für 2025 im Güterverkehr aus:

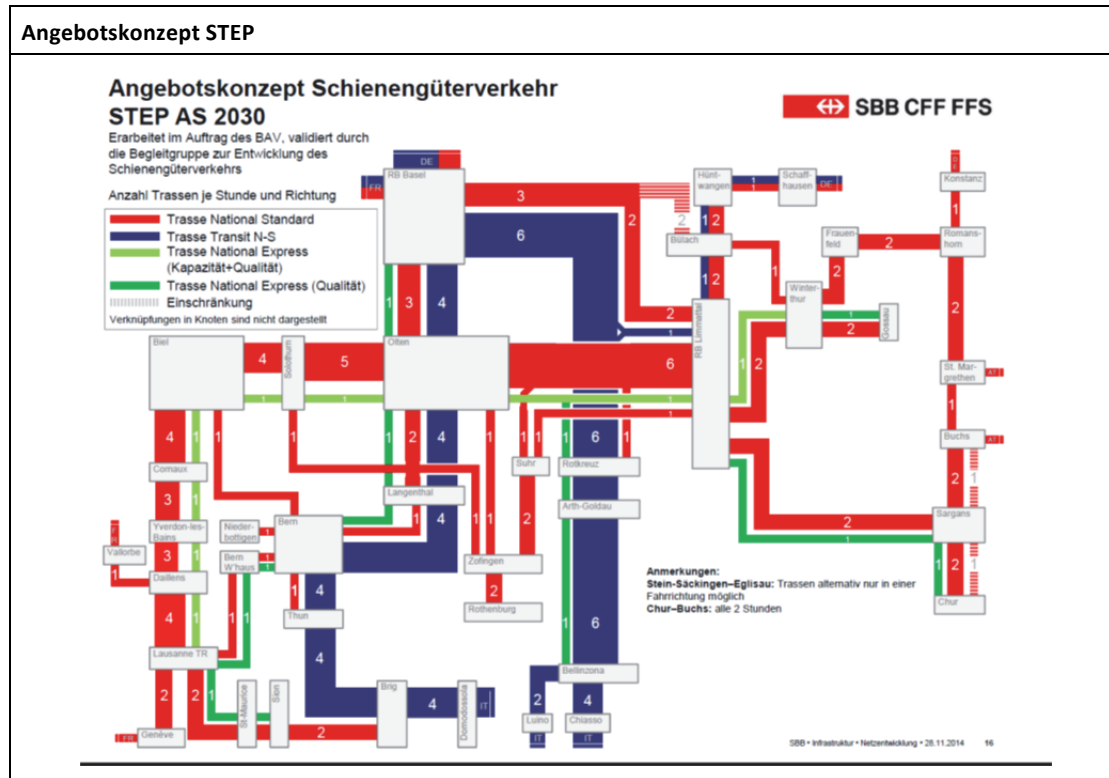


Abbildung 10: Trassenangebot Referenzkonzept Güterverkehr Quelle: SBB / AG Güterverkehr

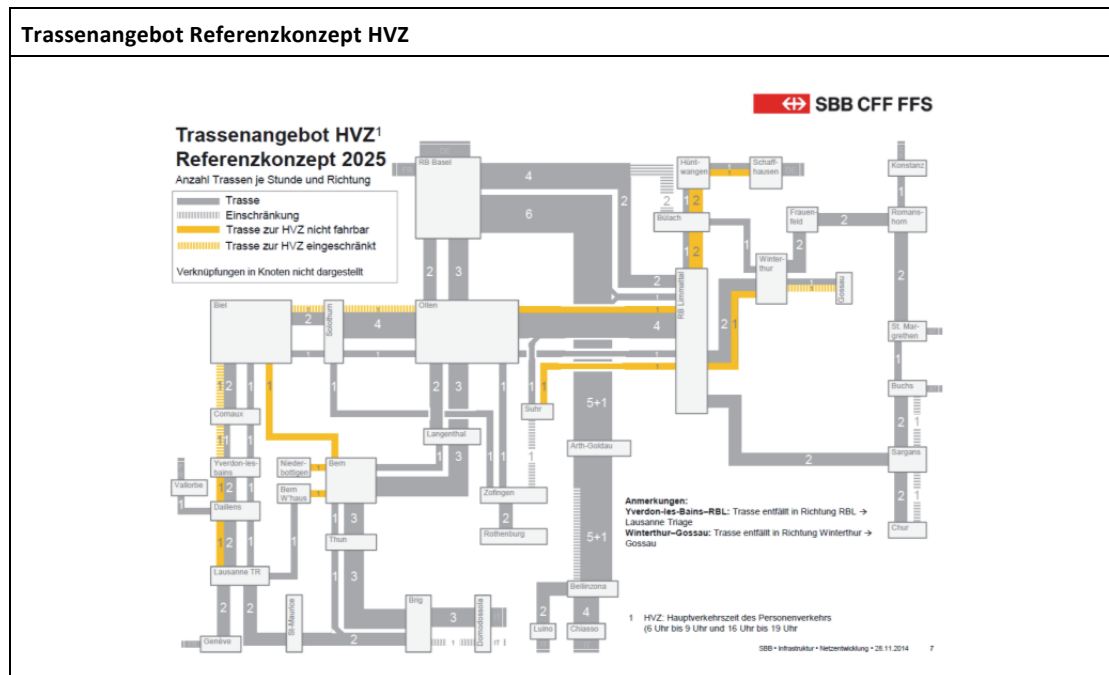


Abbildung 11: Trassenangebot Referenzkonzept HVZ Quelle: SBB / AG Güterverkehr

Eckpunkte Betrieb und Infrastruktur Güterverkehr

Eine Arbeitsgruppe des Bundes (Leitung BAV) hat auf Basis der Angebotskonzepte die Eckpunkte für den Güterverkehr festgehalten. Diese können folgendermassen zusammengefasst werden:

- **Terminals:** Es braucht ein trimodales Grossterminal mit Gateway-Funktion in Basel. Die Umsetzung des Gateway Limmattal wird aktiv offen gehalten und bei dessen Realisierung ist eine Etappierung in Abhängigkeit der Marktbedürfnisse zu prüfen. Weitere Kapazitäten sind in den folgenden Räumen notwendig: Waadt, Gäu, Zürich West und Ost, Ostschweiz, Nordwestschweiz.
- **Qualitätsanforderungen:** Es sind zeitsensitive (mit kurzem Nachtsprung oder tagsüber) und weniger zeitsensitive Verkehr zu unterscheiden. Der Wachstumsschwerpunkt liegt bei den zeitsensitiven Verkehren.
- **Rangierbahnhöfe:** Ziel ist eine weitere Konzentration auf wenige Rangierbahnhöfe. Die Rangierungen sollen möglichst kontinuierlich über den Tag verteilt werden. Drehscheibe für den Binnenschienengüterverkehr ist der Rangierbahnhof Limmattal, ergänzt um Lausanne und Basel.
- **Zuglänge:** Die EWL-V-Züge verkehren mit einer Zuglänge von 550 – 750 m, die übrigen Züge (inkl. alpenquerender Verkehr) mit 750 m.
- **Trassenarten:** Zu unterscheiden sind zwei:
 - Standardtrasse mit vMax 100 km/h (Durchschnitt 60), einer Zuglänge von 750 m und Anhängelasten von 1600 t
 - Expresstrasse mit vMax 120 km/h (Durchschnitt 80), einer Zuglänge von 400 m und Anhängelasten von 800 t
- Es gibt eine Express-Trasse pro Stunde und Richtung zwischen
Lausanne und Rangierbahnhof Limmattal – Gossau
Basel – Olten – Bern – Lausanne
Olten/Rangierbahnhof Limmattal – Tessin
Lausanne – Sion
Rangierbahnhof Limmattal – Chur
Auf allen anderen Relationen gibt es keine Express-Trassen, um eine flexible Trassenbenutzung für alle Zugsgattungen zu ermöglichen

Die folgende Abbildung zeigt einen Entwurf des Zielbildes Güterverkehrsanlagen im Rahmen STEP.

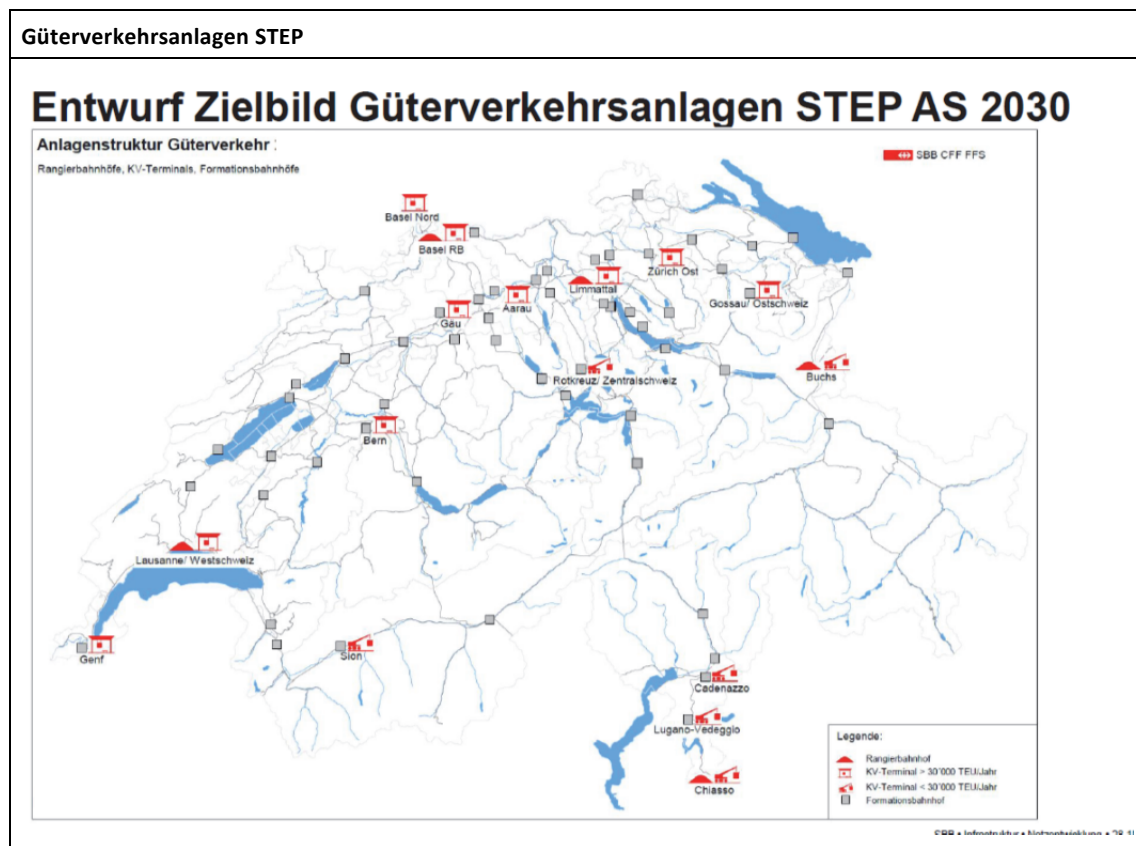


Abbildung 12: Güterverkehrsanlagen STEP Quelle SBB / AG Güterverkehr

Personenverkehrsentwicklung

Es lassen sich folgende Trends festhalten (Basis SBB 2014):

- Das Bundesamt für Statistik hat das Wachstumsszenario Bevölkerung nach oben korrigiert und geht bis 2040 von einer Einwohnerzahl für die Schweiz von 10 Mio. aus. Tendenziell sind also höhere Wachstumsraten im Personenverkehr zu erwarten. Definitive Zahlen dürften Ende 2015 vorliegen (Verkehrsperspektiven ARE).
- Mit den Neubaustrecken erhöht sich das Geschwindigkeitsdifferential zwischen Personen- und Güterverkehr. Damit steigt der Druck auf den Güterverkehr, schneller zu fahren, was mit den Expresstrassen auf den Hauptverkehrsachsen erreicht werden kann.
- Die grösste Dynamik bezüglich Zunahme der Verkehrsbelastung ist in den Agglomerationsräumen (insbesondere Verdichtung tagsüber) zu erwarten, durch die Verdichtung der Taktfolge der neuen S-Bahnkonzepte. Das S-Bahnkonzept 2G des Zürcher

Verkehrsverbunds sieht beispielsweise eine innere S-Bahn (einstöckig) und eine äussere S-Bahn (zweistöckig) vor.

- Infolge des hohen Rollmaterialanspruchs in den Hauptverkehrszeiten werden nach wie vor ältere Rollmaterialkompositionen zum Einsatz kommen. Diese sind aber lärmseitig saniert.

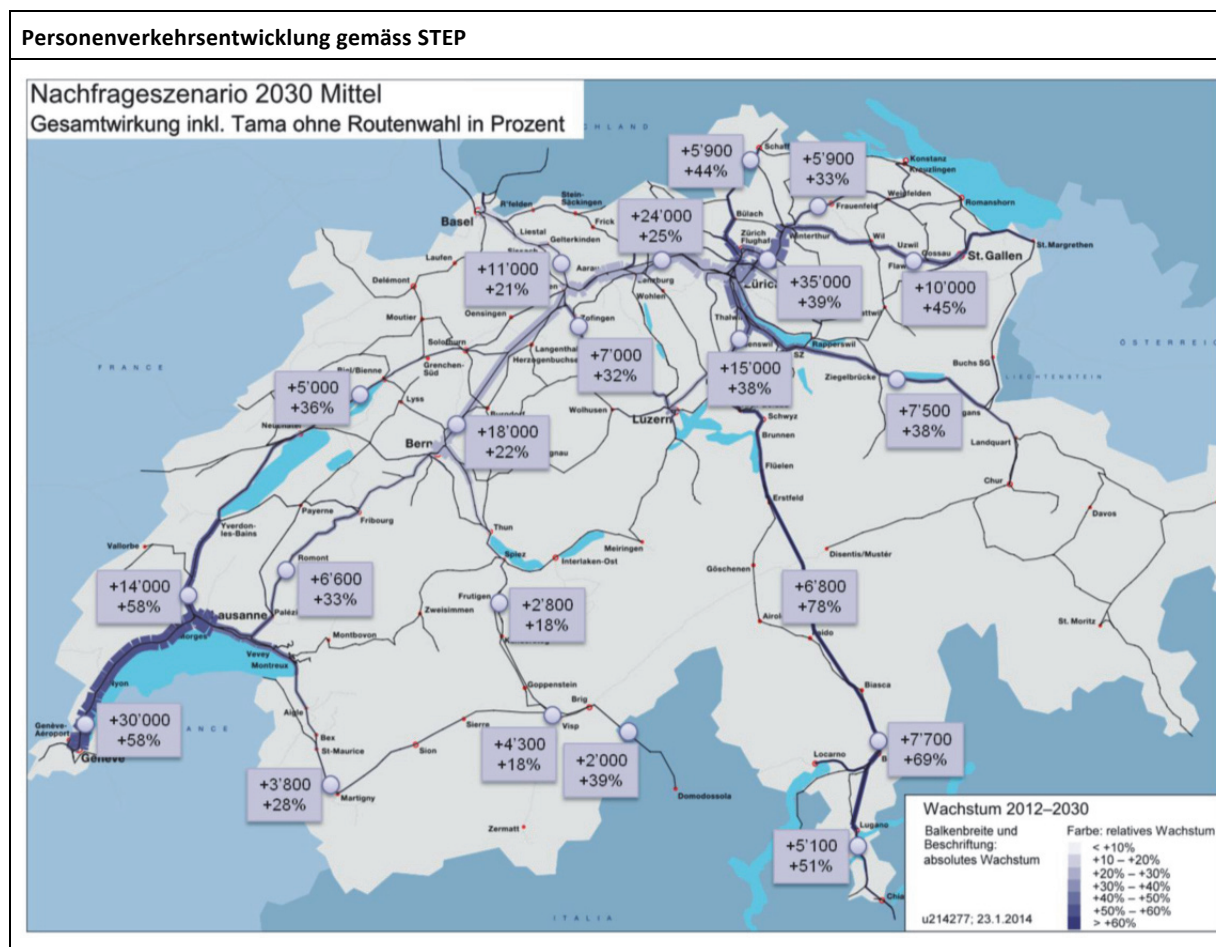


Abbildung 13: Erwartete Zunahmen des Personenverkehrs 2012-2030 gemäss STEP

Die betrieblichen Grundlagen liegen noch nicht detailliert vor. Bekannt ist bis anhin der Fernverkehrsfahrplan, der auf den Hauptachsen die erforderlichen Angebotsverbesserungen abbildet (siehe auch Abbildung 15).

Fazit

- Die erwartete Verkehrszunahme im Personen- und Güterverkehr führt zu einer weiteren Steigerung der Trassennachfrage und damit auch der Zugsfrequenzen. Die grösste Zunahme der Verkehrsbelastung ist in den Agglomerationsräumen (insbesondere Verdichtung tagsüber) zu erwarten.
- Im Güterverkehr ist die Verkehrsnachfrage gemäss den Angebotskonzepten STEP konkretisiert. Der Trassenbedarf im Güterverkehr steigt gegenüber heute an. Die räumlichen Konzentrationen und die Unterscheidung in Standard- und Expresstrassen führt auch aus Sicht Lärm zu einer stärkeren Konzentration (Hauptverkehrsachsen, stärkere Tagesrandbelastung).
- Die Konzentration der Verladeanlagen im kombinierten Verkehr und bei den Rangierbahnhöfen führt – insbesondere im Siedlungsgebiet – zu einer erhöhten Lärmbelastung (Umschlaglärm). Infolge der Dynamik im Stückgutmarkt und der erforderlichen hochgradigen Flexibilität in zeitlicher Hinsicht, dürfte auch der Lärm in Tagesrandzeiten zunehmen. Auf der anderen Seite ist davon auszugehen, dass Kombiverkehrszüge mit Scheibenbremsen ausgerüstet sind und deshalb das Lärmproblem entlasten.
- Auf den Hauptverkehrskorridoren wird die Lärmbelastung infolge der Verkehrsfrequenzen steigen. Auf der anderen Seite führt die Fertigstellung der Basistunnel (Gottard, Ceneri) zu einer Lärmentlastung in einzelnen Berggebieten. Je nach Ausbau der zentralen Bahnhöfe könnten sich im Nahbereich ebenfalls Lärmentlastungen ergeben (betrifft vor allem den Personenverkehr).

3.3 Rollmaterialmarkt

Lärmrelevante Entwicklungen

- Generell werden aus Umweltsicht der Lärm und der Energiebedarf die Entwicklung prägen. Grundsätzlich gibt es Synergien zwischen diesen beiden Themen.
- Neue Loks (30 Hybridloks) und neue Waggonen werden energie- und lärmoptimiert sein. Viel sensibler ist deshalb das Umrüstungsprogramm für alte Wagen bzw. der Einsatz alten Rollmaterials. Ohne staatliche Unterstützungsfinanzierungen ist die Ausmusterung von alten Wagen nicht zu bewältigen.
- Lebensdauererlängerung dank Sanierung. Die SBB Cargo hat die gesamte Flotte vierachsiger Flachwagen für Stammholz und Stahlrohre saniert und die Lebensdauer

um 20 Jahre verlängert. Die vierachsigen Flachwagen sind weniger lärmend als die zweiachsigen.

- Die Vorgaben bezüglich Lärmemissionen der Güterwagen (v. a. CH-Gesetzgebung und Deutschland) prägen die Entwicklung der Lärmperformance des Rollmaterials massgebend. Die Geschwindigkeit der Umrüstung der internationalen Güterwagen (Import-Export und Transitverkehr) ist ein entscheidender Parameter. Bis Ende 2015 wird das Schweizer Rollmaterial lärmsaniert sein. An besonders belasteten Stellen wurden überdies Lärmschutzwände und Schallschutzfenster eingebaut. 2013 beschloss das Parlament, dass die bislang für Neuwagen geltenden Lärmvorschriften ab 2020 auch für ältere Fahrzeuge verbindlich sein sollen. Dies führt faktisch zu einem Verbot von Fahrten lärmiger Güterwagen auf dem Schweizer Bahnnetz. Davon sind vor allem ausländische Bahnen und Wagenhalter betroffen.

Der Koalitionsvertrag in Deutschland sieht vor, den Schienenlärm bis 2020 zu halbieren. Dazu müssen alle alten und lauten Güterwagen entweder durch die Umrüstung der Bremssohlen lärmsaniert werden oder durch neue, leise Güterwagen ersetzt werden. Es geht um rund 180'000 Güterwagen und ca. 300 Mio. Euro Kosten. Dazu kommen Betriebskosten von mehreren hundert Mio. Euro. Falls bei der geplanten Evaluation im Jahr 2016 nicht mindestens die Hälfte der Güterwagen leise ist, sollen ordnungsrechtliche Massnahmen umgesetzt werden. Die Lärminderung durch Umrüstung beträgt bei 100%iger Umsetzung 10 dB(A), was der geforderten Halbierung des Schienenlärms entspricht.

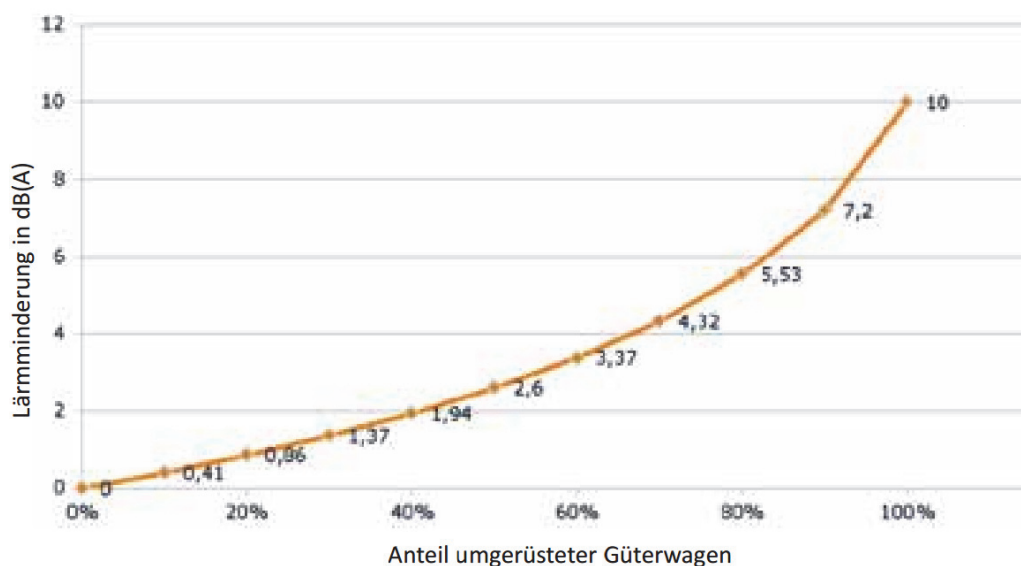


Abbildung 14: Lärminderung durch Anteil umgerüsteter Güterwagen (Quelle: DB Netz AG)

- In Deutschland wird durch die lärmabhängigen Trassenpreise ein Anreiz zur Umrüstung von Bestandsgüterwagen auf lärm mindernde Technologien wie Verbundstoffbremssohlen gesetzt, da ein Bonus für Güterwagen vorgesehen ist, die entsprechend umgerüstet werden und die Lärmgrenzwerte einhalten.

Marktentwicklung

- Auch in Zukunft wird der Rollmaterialmarkt hochspezialisiert sein, mit wenigen Playern. Eine massgebende Senkung des Rollmaterialpreises ist deshalb nicht zu erwarten.
- Komplexer dürften die Eigentumsverhältnisse werden. Die Wertschöpfungskette Produzent-Vermittler-Vermieter-EVU dürfte vielfältiger werden.
- Auf Basis der Entwicklungsszenarien des Bundes gehen die Verkehrsprognosen bis 2030 im Eisenbahn-Personenverkehr von einem Wachstum von rund 60 Prozent aus. In den Ballungsräumen und zu Spitzenzeiten wird die Nachfrage überdurchschnittlich steigen. Beim Güterverkehr ist ebenfalls von einem Wachstum in ähnlicher Grössenordnung auszugehen. Die hierfür nötigen Kapazitäten soll die Vorlage Finanzierung und Ausbau der Bahninfrastruktur FABI mit zeitlich gestaffelten Ausbausritten bereitstellen.

3.4 Infrastrukturbewirtschaftung

- Substanzerhalt: Der Substanzerhalt nimmt in den nächsten Jahren an Bedeutung zu. Dies dürfte zu vermehrten Ausweichfahrten führen, andererseits geht mit den Sanierungen auch eine – räumlich spezifizierbare – Lärmsanierung einher.
- Baulärm: Eine grosse Herausforderung sind die Sanierungen von bestehenden Anlagen unter Betrieb. Dies führt in der Regel zu Bauzeiten während der Nacht, die lärm-sensibel sind.
- Ein erster Ausbauschritt 2025 (FABI) bringt Verbesserungen innerhalb der Ballungsräume und im Agglomerationsverkehr des schweizerischen Städtetetzes sowie im nationalen Güterverkehr. Geplant sind folgende Massnahmen:
 - Ausbauten im Grossraum der Städte Genf, Bern und Lausanne
 - Zusätzliche Gleise in der Bahnhofseinfahrt Basel sowie die Entflechtung Pratteln
 - Ausbauten des Engpasses Holligen und 3. Gleis zwischen Gümligen und Münsingen im Raum Bern sowie Ausbauten zwischen Rupperswil und Mägenwil im Kanton Aargau

- Bau eines Tunnels mit Doppelspur zwischen Ligerz und Twann
- Ausbauten zwischen Bellinzona und Tenero
- Abstell-, Wende- und Überholgleise in Lugano, auf den Strecken Lausanne – Genf, Zürich – Chur sowie im Raum Liestal / Gelterkinden

3.5 Räumliche und gesellschaftliche Entwicklungen

- Die räumliche Entwicklung und die Entwicklung der Verkehrsinfrastrukturen gehen Hand in Hand. Die Erschliessung mit Verkehrsinfrastrukturen ist ein bestimmender Faktor für die Siedlungsentwicklung.
- Die gewollte Verdichtung im Agglomerationsraum steigert einerseits die Potenziale für den öffentlichen Verkehr im Siedlungsraum, führt aber gleichzeitig zu dichterem Bebauung und stärkerer Betroffenheit. Im Einklang mit neuen – lärmoptimierten – Bauweisen bestehen aber auch Chancen, mit der potenziell grösseren Anzahl betroffener Personen umzugehen.
- Generell ist festzustellen, dass die Lärmbelastung im Vergleich zur Lärmbelästigung an Bedeutung verliert. Punktuelle Störungen fallen vermehrt ins Gewicht. Der Lärmbonus könnte deshalb in Zukunft stärker unter Beschuss geraten.
- Sensibilisierung und Information dürften in Zukunft ein Kernthema sein, um die Akzeptanz gegenüber Lärm zu erhöhen. Der Lärm wird zunehmen, nicht zuletzt um die stetig steigenden Mobilitätsbedürfnisse zu befriedigen.

4 Stakeholdereinbezug

Am 3. März 2015 wurde an der ETH Zürich ein Workshop veranstaltet, bei dem die verschiedenen Stakeholder des schienengebundenen Verkehrs eingebunden wurden. Eingeladen und gekommen sind Vertretende der Wagenhersteller, der Wagenvermieter, des BAFU, des BAV, der Hochschulen sowie der Infrastrukturbetreiber, insgesamt rund 30 Teilnehmende. Das Forschungsprojekt wurde vorgestellt und mit einigen Eingangsreferaten der aktuelle Stand der Forschung dargestellt. Herr Markus Maibach stellte die Einflussfaktoren auf die Entwicklung des Bahnverkehrs dar (siehe voriges Kapitel). Anschliessend präsentierte Herr Dr. Jakob Oertli die aktuelle Perspektive und die derzeitigen Entwicklungen der SBB.

Die Teilnehmer waren gebeten worden, eine kurzes Statement zu ihrer Sicht der Lage vorzubereiten. Es zeigte sich, dass die Reduzierung des Eisenbahnlärms ein Anliegen aller ist, sich die Teilnehmer jedoch unterschiedlichen Hindernissen gegenüber sehen. Am Nachmittag wurden diese Thematiken in drei Gruppen (Infrastruktur, Rollmaterial, Sonstiges) eingehend diskutiert. Die folgenden Unterkapitel stellen die Ergebnisse der Gruppenarbeiten dar.

4.1 Teilnehmerkreis

Die folgenden Personen haben am Workshop teilgenommen.

Bundesamt für Umwelt	Dr. Christoph Wenger, Sektionschef Abteilung Recht
Bundesamt für Verkehr, Abteilung Infrastruktur	Dr. Ruedi Sperlich, stv. Leiter Dr. Robert Attinger
SBB Infrastruktur	Dr. Jakob Oertli, Lärmsanierung Michael Hafner, Lärmsanierung
SBB Cargo	Jens Erik Galdiks, Leiter Flottentechnik
SOB	Christian Schlatter, Infrastruktur Anlagenmanagement
ÖBB Infrastruktur AG	Dr. Günter Dinshob, Streckenmanagement und Anlagenentwicklung
Railcargo Austria	Alfred Pitnik, Einkauf, Anlagen- & Managementservices Norbert Buttinger, Assets
Verband öffentlicher Verkehr VöV	Martin Strobel, Ressort Technik
VAP, Cargorail	Markus Vaerst, Regulation Technik
AAE	Dietmar Gilliam, Leiter Zulassung und Sanierung Hanno Schell, Leiter Technik
Hupac Intermodal	Michael John, Business Manager Rolling Stock Development
Ferriere Cattaneo	Dr. Eugenio Moro, Leiter Technik
Josef Meyer Rail AG	Jose Luis del Rio, Geschäftsleiter
EMPA	Dr. Jean Marc Wunderli, Lärmbekämpfung
Auftragnehmer	Prof. U. Weidmann ETH/IVT (Begrüssung) Dr. Dirk Bruckmann, ETH/IVT Patrick Braess, ETH/IVT Prof. Dr. Markus Hecht, TU Berlin Sebastian Sohr, TU Berlin Jenny Böhm, TU Berlin Markus Maibach, INFRAS (Moderation, Protokoll)

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Statements der Teilnehmenden

SBB Infrastruktur

Die Vertreter von SBB Infrastruktur fassen ihre Statements im Rahmen einer Präsentation (s. Anhang) zusammen. Im Zentrum stehen folgende Themen:

Vorschlag 1: Forschungsumgebung, -plattform schaffen (national - international), um die verschiedenen Forschungsthemen zu koordinieren und den Know How Transfer (zwischen den verschiedenen Forschungsakteuren und zwischen Wissenschaft und Industrie) sicher zu stellen und

Vorschlag 2: Konkrete Themen bearbeiten:

- Fahrbahnoptimierungen aus Go-Leise, Beispiele
 - Weiterentwicklung Schienenzwischenlage
 - Lärmoptimierte Befestigung
 - Kontrolliertes Anziehen der Schienen
- Schienenrauheit
 - Ursachen erhöhte Schienenrauheit
 - Gewährleistung Qualität
- Kurvenkreischen z. B. Wiener Bogen
- Weichenstöße z. B. zusammen mit SBB Projekt «Upgrade Weiche»
- Schienenstöße
- Bremskreischen
- Dynamisches Fahrverhalten, adaptive Lenkung
- Optimierte Streckenbelastung durch Güterzüge

BAV

- Zentrale Themen sind:
 - Nachtverkehr und Lärm
 - Rollmaterialentwicklung (Technik ist vorhanden, wie wirtschaftlich umsetzen?)
 - Unterhalt und Lärmauswirkungen bzw. Synergien mit Lärmsanierungen
 - Infrastruktur: Reaktion elastischer Elemente auf Lärm und Erschütterungen

- Die Forschung soll eine hohe Effektivität aufweisen. Der Auftrag des Parlaments ist klar auf die Sanierung von übermässig durch Bahnlärm belasteten Personen ausgerichtet. Dabei spielt das Kriterium der Verhältnismässigkeit eine zentrale Rolle.
- Die Ansprüche an den Lärmschutz werden steigen. Eine grossflächige Wirkung ist gefragt. Rollmaterialmassnahmen stehen deshalb im Vordergrund. Der Zusammenhang zwischen Traktionswirkung und Rollgeräusch ist ein wichtiges Forschungsthema.

SBB Cargo

- Die Techniken sind grundsätzlich vorhanden. Im Vordergrund steht nun die Frage nach einem optimalen Migrationspfad (Übergangstechnologien und finale Zustände). So sei z. B. die LL-Sohle eine typische Übergangstechnologie. Dabei sind die (in den verschiedenen Ländern unterschiedlichen) Zulassungstechnologien zu beachten (Aufwand- und Komplexitätstreiber).
- Das Forschungsprogramm sollte auch den Güterverkehr der Zukunft einbeziehen (z. B. neue Drehgestelle, Optimierung Loks, Automation - automatische Kupplung; neue Logistiksysteme).
- Angesichts der Probleme im Bereich Wirtschaftlichkeit sollten innovative Finanzierungsformen analysiert werden.

SOB

- Bei den Meterspurbahnen steht weniger der Güterverkehrslärm, sondern der Personenverkehr (z. B. Doppeltraktionen) im Vordergrund. Von Bedeutung ist auch der Baulärm für Unterhaltsarbeiten. Dies gilt auch für den Lärm von Abstellanlagen. Das Forschungsprogramm sollte diese Schnittstelle zum Industrielärm beleuchten.
- Weitere wichtige Themen:
 - Materialwahl
 - Meterspur und Bremsweg bei grossen Gefällen
 - Lückenlose Gleise in engen Bögen
 - Schienenkopfkonditionierung

VöV

- Tram und Meterspur sollten in der Forschung ein angemessenes Gewicht erhalten.
- Fachgruppe VÖV beschäftigt sich derzeit mit Spurkranzschmierung und Sprühmittel gegen Kreischen sowie lückenlos verschweisste Gleise.

- Schnittstellen zwischen Infrastruktur und Rollmaterial sind von grosser Bedeutung. Das Gesamtsystem ist zu beachten (z. B. Schienenkopf-Dimensionierung, Lüftungsanlagen, automatische Kupplung).

VAP

- Selbsttragende (wirtschaftlich) Lösungen sollten in den Forschungsthemen ein hohes Gewicht haben.
- Die Neuentwicklung von Fahrzeugen (Systemansatz) hat aus Sicht VAP hohe Priorität.
- VAP kann als Partner Feedbacks aus Kundensicht einbringen.

ÖBB Infrastruktur

- ÖBB ist wichtiger Akteur bei der Infrastruktur-Forschung und hat eigene Arbeiten in ETR-Ausgabe publiziert. Momentan laufen Forschungsarbeiten im Bereich Lärm an Gleisbögen, Lärm-Wahrnehmung, Meteorologie und Schallausbreitung, Flachstellen und Lärmauswirkungen.
- Nach Umsetzung der bekannten Technologien (K-Sohle, LL-Sohle) sind gegenwärtig keine weiteren signifikanten Sprünge (minus 10 dB(A)) in Sicht.
- Zentral werden deshalb Systemoptimierungsfragen sowie Fragen zur Wirtschaftlichkeit und Verhältnismässigkeit (z. B. Zwischenlagen, Radgrösse) und die Kombination von Massnahmen infrastruktur- bzw. rollmaterialeseitig.
- ÖBB kann im Rahmen des CH-Forschungsprogramms einen Vernetzungsbeitrag leisten.

Rail Cargo Austria

- RCA schaut nach D und CH bez. Prioritäten in der Flottenumrüstung. In anderen Ländern (insbesondere Osteuropa) ist die Lärmproblematik kein Thema. Entsprechend gross ist die Herausforderung in einem internationalen Markt den verschiedenen Anforderungen (und Zulassungsverfahren) gerecht zu werden.
- Aus Sicht RCA steht die Infrastruktur als Forschungsthema im Zentrum.

J. Meyer Rail AG

- Leila Drehgestell soll weiter entwickelt werden.
- JM macht eigene Forschung für Lärmoptimierung bei Oberbau Kieswagen.

- Folgende Forschungsthemen sind wichtig:
 - Kostenoptimierung (Lärm vs. Kostenfolgen und Möglichkeiten der Finanzierung);
 - Diagnostik Infrastruktur und Rollmaterial hinsichtlich Lärm verbessern;
 - Lärmschürzen
- J. Meyer Rail AG kann Praxiswissen und Versuchsanordnungen einbringen.

AAE

- Die Umrüstung auf neue Bremssysteme läuft. Im Zentrum stehen neben der K-Sohle auch die LL-Sohle und Scheibenbremsen. Ebenfalls entwickelt werden bei AAE neue Drehgestelle mit Gummidämpfern. Wichtig ist, dass die Forschung technologieneutral bleibt.
- AAE ist sehr skeptisch bezüglich Innovationsbereitschaft in der Industrie angesichts der geringen Rentabilitätsaussichten im Bahn-Güterverkehr. Nach den genannten Technologien dürften die Kosten für zusätzliche Lärmeinsparungen steigen. Es stellt sich also die grosse Frage, wie diese finanziert werden sollen. Die Forschung muss sich zwingend mit den Kostenfolgen (LCC: direkte Umrüstkosten, Folgekosten Unterhalt etc.) beschäftigen.
- Einsparpotenziale könnten sich bei adaptiven Lenkungssystemen (Drehgestell) ergeben.
- Weitere wichtige Themen sind Anreizsysteme und Lärmmesssysteme, die den Lärm von Fahrzeug und Infrastruktur getrennt erfassen.

F. Cattaneo

- Beim Rollmaterial ist die Optimierung verschiedener Parameter zu beachten. Deshalb sollte die Forschung einen Systemansatz verfolgen.
- Mit K-Sohle und LL-Sohle ist ein grosser Schritt gemacht. Der nächste Schritt sind Scheibenbremsen, allerdings mit entsprechenden Kostenfolgen. Der Technologiepfad sollte dynamisch analysiert werden.

Hupac

- Die Erstbeschaffung von Wagen findet seit dem Jahr 1999 ausschließlich mit K-Sohlen statt. In 2015 wird die Lärmsanierung von ca. 800 Wagen bei Hupac abgeschlossen sein. Die Flotte von Hupac ist dann zu 98 % mit K-Sohlen ausgerüstet. Bei

den Kosten wird nur durch die Zahlung des Lärmbonus der Schweiz in etwa eine Neutralität zwischen K und GG gebremsten Wagen erreicht.

- Daneben ist die Weiterentwicklung auf Scheibenbremsen ein zentrales Thema (Reduktionspotential -2.5 dB, weitere 2 dB können mit neuen Beschichtungen erreicht werden). Zukünftige Ziele sind auch die Minimierung des höheren Gewichtes und die Reduzierung der Investitionskosten. Wagen mit Scheibenbremsen müssen sich über geringere LCC Kosten rechnen, ohne eine Investitionsförderung.

empa

- Der Zusammenhang zwischen Lärm und Unterhalt ist vor allem auch aus gesundheitlicher Sicht zentral (z. B. Aufwachgeräusche aufgrund von Bauarbeiten).
- Punktuelle Eingriffe vs. Systemfragen: Das Forschungsprogramm sollte möglichst das Gesamtsystem beleuchten, ohne sich in Details zu verlieren.
- Die Infrastruktur steht als Forschungsthema im Zentrum.

4.3 Ergebnisse Gruppenarbeiten

4.3.1 Infrastruktur

Moderation: D. Bruckmann (Protokoll) / P. Braess

Wissenstransfer

Die Arbeitsgruppe sieht einen grossen Bedarf daran, das vorhandene Wissen im Bereich der Lärmreduktion zusammenzutragen. Die Organisation soll durch eine Wissensplattform an einer Hochschule erfolgen.

Forschungsthemen

- Infrastrukturseitige Massnahmen zur Lärmreduktion sollen vorrangig durch Verbesserungen an bestehenden Fahrbahnelementen erfolgen. Bei sämtlichen Massnahmen zur Lärmreduktion sind die Lebenszykluskosten (LCC) mit zu berücksichtigen. Aus diesem Grund werden ergänzende Fahrbahnelemente wie Schienenstegdämpfer oder

niedrige Lärmschutzwände eher kritisch gesehen, da sie den Unterhalt der Fahrbahn verteuern und teilweise auch sicherheitskritische Aspekte umfassen können (z. B. Schienenstegdämpfer im Bogen).

- Forschungsbedarf besteht dementsprechend im Bereich der Optimierung der vorhandenen Fahrbahnelemente (Schienenzwischenlage, Schwelle, Schienenbefestigung). Diese kann auf Ebene der einzelnen Komponente aber auch in der Interaktion zwischen den Komponenten liegen. Die genaue Ausgestaltung und das Optimierungsziel (Lärm oder LCC) ist stark von den Umfeldbedingungen abhängig, da nur in lärmsensitiven Bereichen mit vielen Betroffenen allfällige Mehrkosten eines lärmsensitiven Oberbaus gerechtfertigt sind.
- Ein weiteres Forschungsfeld ist die Schienenrauheit. Hier sind Messverfahren zu entwickeln, die eine effiziente netzweite Messung der Schienenrauheit ermöglichen. Zusätzlich sind die Wirkungen verschiedener Schleifverfahren und -strategien zu ermitteln, um lärmoptimiertes Schienenschleifen zu ermöglichen.
- Im Bereich des Kurvenkreischens ist der Trade-off zwischen fahrzeugseitigen und infrastrukturseitigen Anlagen zu untersuchen. Dieses vor allem vor dem Hintergrund einer Mischnutzung des Netzes durch unterschiedliche Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), die eine konsistente fahrzeugseitige Ausstattung mit Spurkranzschmierung erschweren.
- Wichtig ist die weitere Forschung und Umsetzung im Bereich des lückenlos verschweissten Gleises in engen Bögen. Durch den Wegfall von Stosslücken würden diese als Lärmquelle entfallen. Gleichzeitig würden die LCC des Oberbaus an diesen Stellen reduziert.
- In anderen Bereichen wird seitens SBB Infrastruktur und SOB kein Forschungsbedarf gesehen. Im Bereich der Rangieranlagen gibt es wenig Betroffene.

4.3.2 Rollmaterial

Moderation: Prof. M. Hecht / J. Böhm (Protokoll)

Forschungsbedarf besteht sowohl bei der Schallminderung von Güterwagen als auch von Lokomotiven. Denn bei leiser werdenden Güterwagen tritt die Lokomotive in den Vordergrund und ist dann bspw. hauptsächlich für Aufweckreaktionen verantwortlich. Die Schallminderung von Lokomotiven war jedoch nicht Schwerpunkt der Diskussion, da keine Lokomotivhersteller anwesend waren. Generell kann der Lärm von Güterwagen durch Verringerung

der Schwingungsanregung (z. B. weniger raue Laufflächen durch Ersatz der GG-Sohle, Verbesserung der Laufeigenschaft durch bessere Federung), Minderung der Schwingung und Abstrahlung (z. B. Bedämpfung des Radsatzes oder Drehgestells, neue Radgeometrie durch Radscheibenbremse, kleinere Räder) und Verringerung der Körperschallausbreitung durch Entkopplung und Dämpfung reduziert werden. In der Diskussion stand die Bremstechnik im Vordergrund. Hier wurden folgende Forschungsbedarfe / Problematiken diskutiert:

- K/LL-Sohle:
 - Radschonende Bremssohle: Der im Vergleich zur GG-Sohle größere Verschleiß der LL- und K-Sohle und damit die höheren Betriebskosten wirken hemmend auf die Umrüstung. Hier besteht Bedarf in der Entwicklung einer radschonenderen, leicht tauschbaren und die Lauffläche nicht aufrauenden Bremssohle.
 - Zulassungsverfahren: Problematisch ist die langwierige und kostenintensive Einzelzulassung jeder Weiterentwicklung bei den Bremssohlen. Es besteht der Wunsch nach einem einfacheren, auf einem Rechenmodell basierenden Zulassungsprogramm.
- Scheibenbremse: Bei der Scheibenbremse ist noch wenig über Radschädigungen (z. B. Ausbröckelungen) bekannt. Es ist auch eine Materialoptimierung denkbar.
- Änderung des Bremsverhaltens: Durch Ersatz der pneumatische Bremse durch eine elektropneumatische oder elektrische Bremse könnte materialschonender gebremst und der Bremsweg verkürzt werden. Bei diesem System ist eine elektrische Energieversorgung notwendig.

Weitere Themen, die während der Diskussion aufkamen sind:

- Nachweis der Wirksamkeit von Lärminderungsmaßnahmen: Es sind zwar bereits viele Technologien zur Lärminderung im Güterverkehr bekannt (siehe Präsentation), jedoch ist ihre Wirksamkeit nicht eindeutig bestimmt. Die Angaben zum Minderungspotential variieren zum Teil erheblich. Hier besteht Forschungsbedarf zur Bestimmung der Wirksamkeit unter definierten und für den Betrieb relevanten Randbedingungen.
- Fragen der Finanzierung: Ein zentrales Problem beim Einsatz neuer Technologien zur Schallminderung sind die damit verbundenen Kosten. Hier ergaben sich folgende Forschungsfelder.
 - Finanzierungsmodelle für Lärminderungsmaßnahmen
 - Übernahme der Technologien aus anderen Branchen (z. B. Scheibenbremse LKW)
 - Europaweite Standardisierung der Rad- und Bremssysteme könnte zu geringeren Produktkosten und mehr Wettbewerb unter den Herstellern führen

- Refinanzierung der Schallminderungsmaßnahmen durch gemeinsame Betrachtung der Themen Verschleiß und Lärm bzw. Energieeffizienz und Lärm
- Kommunikation zwischen Hersteller und Kunde: Es wurde der fehlende Austausch zwischen Hersteller und Kunde bemängelt und die dadurch fehlende Passgenauigkeit neuer Technologien. Hier könnte die Forschung als Vermittler helfen.

4.3.3 Gesamtsystem / weitere Themen

Moderation: M. Maibach

- Systembezug Infrastruktur-Rollmaterial: Die Themen sind im System Fahrzeug-Gleis zu betrachten (basierend auf Rad-Schiene Technologie). Beispielhafte Themen sind
 - Schienenkopf-Konditionierung
 - Allokation der Lärmverursachung: Schallaufteilung auf die verschiedenen verursachenden Elemente
- Systembezug Optimierungsfragen:
 - Die zentralen Fragestellungen lauten:
 - a) Wie kann der Mehrwert von Optimierungen in anderen Bereichen (Kapazität, Servicequalität, Sicherheit) dazu verwendet werden, die notwendigen Lärmauswirkungen zu kompensieren bzw. zu reduzieren?
 - b) Wo können Synergien geschaffen werden, die auch den Lärm reduzieren?
 - Lärm und Geschwindigkeit: Wichtig ist der Einfluss der Anpassung der Geschwindigkeiten PV-GV und die Potenziale, Güterverkehre tagsüber fahren zu lassen. Die Logistikabläufe dürften aber dazu führen, dass das Potenzial gering ist. Eher zu erwarten ist, dass schnellere Güterverkehre mehr Lärm erzeugen. Abschöpfungsmöglichkeit: Trassenpreis
 - Lärm und Unterhalt: Wie können Unterhaltmassnahmen gleichzeitig mit Lärmsanierungen gekoppelt werden? Wie können Lärmauswirkungen von Unterhaltsarbeiten (nachts) möglichst lärmschonend abgewickelt werden? Massnahme: Betriebsvorgaben, Unterhaltspläne Infrastruktur-Lärm
 - Lärm und 24 Stundenbetrieb bzw. Nachtbetrieb in sensiblen Räumen: Wie können Trassen optimiert werden (z. B. Bündelung), um in Tagesrandzeiten und Nachtzeiten möglichst lärmschonend zu fahren? Massnahme: Betriebsvorgaben, Trassenpreis
Eher weniger Potenzial haben konkrete Verbote (z.B. nur Betrieb mit lärmschonenden Bremsen). Der betriebliche Spielraum dürfte gering sein.
- Systembezug Lärm-Verschleiss:
 - Bremssteuerung und automische Bremsprobe

- Ausrüsten von Zugkontrollsystemen (z. B. Radlast Checkpoints) mit Fokus Lärm zum Erkennen von Flachstellen bei den Rädern (die auch den Verschleiss erhöhen)
 - Vertiefung der Zusammenhänge Verschleiss-Lärm und Möglichkeiten der Berücksichtigung im Trassenpreis
- Entwickeln von Analyseinstrumenten (Tools) für die Berücksichtigung des Systembezugs:
 - Auswirkungen von Lärmschutzmassnahmen auf LC-Kosten und weitere Parameter
 - Auswirkungen von anderen Optimierungen auf den Lärm
- Abgrenzungsfragen Forschungsprogramm:
 - Tram/Stadtbahnen sind nicht Forschungsgegenstand, weil politischer Fokus auf Bahn(güter-)lärm
 - Industrielärm (Baumaschinen, Terminals etc.): Relevanz soll abgeklärt werden, Schnittstellen (v.a. Bau/Unterhalt) soll einbezogen werden
 - Rangierlärm: Relevanzorientierter Einbezug
- Vernetzung des Forschungsprojekts: Ist anzustreben, um internationales Renommé zu erreichen und Know-How Transfer zu pflegen. Es ist sinnvoll eine Wissensplattform aufzubauen, mit Lead Hochschule (z. B. empa).

4.3.4 Erkenntnisse

Erkenntnisse für das Forschungsprojekt

- Der Fokus des Forschungsprojekts ist auf Effektivität zu legen: Relevante Themen gezielt bearbeiten und systemisch einbetten; fokussieren und vernetzen.
- Das Forschungsprojekt darf nicht einseitig technisch ausgerichtet sein. Insbesondere der ökonomische Bezug (Kostenfolgen, Finanzierung) ist zu berücksichtigen. Die Forschungsergebnisse sollen wirtschaftlich attraktiv sein bzw. entsprechende Anreize sind zu prüfen wie dies bewerkstelligt werden kann.
- Die Systemfragen weisen eine hohe Relevanz auf. Sie sind gebührend zu berücksichtigen (Schnittstellen zu anderen Themen; Inland - Ausland).
- Die laufenden Forschungsarbeiten und die Forschungsvernetzung soll aufgezeigt werden.
- Der Bezug zu den Monitoringsystemen soll geklärt werden.

Weiteres Vorgehen

- Die ARGE wird die Ergebnisse auswerten und die Relevanz für die CH entlang eines Kriteriensets prüfen. Zentral sind Informationen zur Betroffenheit und zur Marktpenetration.
- Zu prüfen sind bilaterale Kontakte zu den Lokherstellen (die am Workshop nicht vertreten waren).
- Die Workshop-TN werden Gelegenheit haben, Feedbacks zum Entwurf des Schlussberichts zu geben (Zeitpunkt: Herbst 2015).

5 Analyse des Status-Quo der Teilsysteme Bahn und Ausdifferenzierung der Verkehrsleistungen

5.1 Analyse des Verkehrs

Ausgehend von den Trendanalysen in Kapitel 3 werden in diesem Kapitel die quantitativen Eckpunkte für den Zeithorizont 2025 konkretisiert. Für die Analyse des Verkehrs und vor allem für die Ableitung einer Verkehrsentwicklung wurde ein Set von SBB Eisenbahnabschnitten auf Hauptverkehrsachsen ausgewählt, dessen Trassen und Rollmaterialentwicklung zwischen 2015 und 2025 absehbar ist, und somit zu einer qualitativen Herleitung der Entwicklung des Lärms genutzt werden kann. Die folgende Liste zeigt das Set der Linien und die Anzahl Trassen der einzelnen Linien im heutigen Fahrplan, differenziert nach Personen- und Güterverkehr.

Anzahl Trassen pro Tag im Fahrplan 2015 von ausgewählten Linien							
	Trassen 2015 in Trassen pro Tag						
	Personenverkehr			Güterverkehr			
	Fern	Regio	Total	WLV	UKV	Rola	Total
Lausanne-Triage - Genève La Praille	216	0	216	9	1	0	10
Palézieux - Fribourg	72	36	108	4	0	0	4
St. Maurice - Sion	72	54	126	27	0	0	27
Spiez - Wengi-Ey Abzw.	54	36	90	15	36	15	66
Cornaux - Biel	72	36	108	41	1	0	41
Sissach - Hauenstein-Basistunnel - Olten	216	108	324	29	35	15	80
Stein-Säckingen - Brugg AG Nord	72	36	108	46	52	0	98
Hendschiken - Rotkreuz	0	72	72	0	0	0	0
Mägenwil - Gruemet	324	36	360	52	2	0	54
Olten Ost - Aarau	252	36	288	63	2	0	66
Aarburg-Oftringen Süd - Zofingen	162	36	198	9	0	0	9
Eglisau - Bülach	54	108	162	22	6	0	28
Thalwil - Pfäffikon SZ	144	144	288	20	0	0	20
Pfäffikon SZ - Ziegelbrücke	144	72	216	18	0	0	18
Winterthur - Gossau SG	108	54	162	12	0	0	12
Winterthur - Romanshorn Süd	72	72	144	8	0	0	9
Pollegio Nord / Biasca - Bellinzona	54	216	270	26	62	0	88
Lamone-Cadempino (bif) / Vezia - Balerna per Smistamento (bif)	18	90	108	19	24	0	43
Cadenazzo - Luino	0	108	108	2	35	0	37
Total	2'106	1'350	3'456	422	258	30	711

Abbildung 15: Trassenübersicht Personen- und Güterverkehr

Die folgenden qualitativen Aussagen beziehen sich jeweils auf das ausgewählte Set an Abschnitten und darf nicht auf das gesamte SBB Netz übertragen werden. Die Aussagen beruhen auf den aktuellen Planungsgrundlagen der SBB. Zur Hochrechnung der stündlichen Trassen

wurden auf allen Linien täglich 18 h Betriebsstunden hinterlegt. Die Berechnung der Güterverkehre wurde anhand der Tonnage auf Züge umgerechnet, indem angenommen wurde, dass ein Güterzug (unabhängig vom Modus) 1500 Tonnen schwer ist.

Aus obiger Abbildung geht hervor, dass der Güterverkehr heute ca. 17 % der, auf den ausgewählten Linien, etwas über 4000 Trassen pro Tag befährt. Der Anteil des Fernverkehrs liegt bei ca. 50 % und derjenige des Regionalverkehrs bei rund 33 %. Erklärend muss gesagt werden, dass die Unterteilung Fern- und Regionalverkehr aus Sicht Rollmaterial getätigt wurde. Dies ist notwendig, um daraus eine Lärmentwicklung abzuleiten. Das Rollmaterial hat den grössten Einfluss auf den Lärm eines Zugs. Das heisst, Intercities, Interregios und Regio-Express werden zum Fernverkehr gezählt, da diese aus Sicht Rollmaterial verwandt sind. Regios, S-Bahnen und beschleunigte S-Bahnen sind aus rollmaterial-technischen Gründen im Regionalverkehr zusammengeschlossen.

Erwartete Entwicklung des Verkehrsaufkommen 2015 bis 2025 (in %, gerundet)							
	Entwicklung Verkehrsaufkommen 2015 bis 2025 in %						
	Personenverkehr			Güterverkehr			
	Fern	Regio	Total	WLV	UKV	Rola	Total
Lausanne-Triage - Genève La Praille	0%	100%	33%	20%	0%	0%	20%
Palézieux - Fribourg	0%	0%	0%	25%	0%	0%	15%
St. Maurice - Sion	0%	33%	15%	10%	0%	0%	9%
Spiez - Wengi-Ey Abzw.	0%	0%	0%	45%	10%	66%	33%
Cornaux - Biel	0%	100%	33%	33%	0%	0%	30%
Sissach - Hauenstein-Basistunnel - Olten	0%	0%	0%	10%	10%	66%	20%
Stein-Säckingen - Brugg AG Nord	0%	0%	0%	45%	100%	0%	75%
Hendschiken - Rotkreuz	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mägenwil - Gruemet	0%	200%	20%	60%	-75%	0%	55%
Olten Ost - Aarau	2%	300%	30%	25%	25%	0%	30%
Aarburg-Oftringen Süd - Zofingen	0%	200%	40%	25%	0%	0%	25%
Eglisau - Bülach	0%	0%	0%	20%	60%	0%	30%
Thalwil - Pfäffikon SZ	0%	0%	0%	20%	0%	0%	20%
Pfäffikon SZ - Ziegelbrücke	0%	0%	0%	20%	0%	0%	20%
Winterthur - Gossau SG	25%	60%	33%	25%	0%	0%	25%
Winterthur - Romanshorn Süd	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pollegio Nord / Biasca - Bellinzona	33%	0%	10%	60%	90%	0%	80%
Lamone-Cadempino (bif) / Vezia - Balerna per Smistamento (bif)	100%	60%	66%	70%	90%	0%	85%
Cadenazzo - Luino	100%	100%	100%	33%	90%	0%	90%
Total	5%	40%	20%	33%	66%	66%	50%

Abbildung 16: Entwicklung des Verkehrsaufkommens 2015 bis 2025 (Grundlage STEP, Berechnungen INFRAS)

Grundlage für die Abschätzung der Trassenentwicklung im PV und GV ist das Referenzkonzept ZEB und STEP 2025 (Stand 08.2014). Aus der Abbildung 16 geht hervor, dass sowohl

die Personenverkehr- als auch die Güterverkehrstrassen in den 10 Jahren von 2015 bis 2025 zunehmen. Die Zunahme im Personenverkehr sieht folgendermassen aus. Über alle ausgewählten Streckenabschnitte nehmen die Trassen für Fernverkehr-Rollmaterial um rund 5 % zu. Die Trassen für Regios und vor allem S-Bahnen nehmen im gleichen Zeitraum um rund 40 % zu. Die grössten Ausbauten betreffen die Ost-West Hauptachse (Olten –Aarau), die Verlängerung der NEAT über Luino und die Strecke Genf - Lausanne. Gesamthaft werden im Jahr 2025, bezogen auf die ausgewählten Strecken, rund 18 % mehr Trassen für den Personenverkehr zur Verfügung stehen.

Die Entwicklung im Güterverkehr findet auf einem tieferen absoluten Niveau statt. Wie bereits erwähnt liegt der Anteil des GV aller genutzten Trassen auf den ausserwählten Abschnitten im Jahr 2015 bei 17 %. Gesamthaft werden 2025 dem Güterverkehr rund 50 % Trassen pro Tag mehr zur Verfügung stehen als heute. Der Wagenladungsverkehr wächst um ca. ein Drittel und der kombinierte Verkehr um ca. zwei Drittel. Auch die Rola wächst, auf sehr tiefem absolutem Niveau, um ca. zwei Drittel. Gesamthaft betrachtet, werden zwei Drittel der zusätzlichen Trassen in zwei Regionen frei. Auf der Nord-Süd Achse im Tessin und zwischen Basel und Zürich (Gateway Limmattal).

Für eine qualitative Abschätzung zur Entwicklung des Bahnlärms sind hauptsächlich zwei Faktoren entscheidend. Dies sind, die Angebotsveränderung differenziert nach Geschwindigkeitsabhängigen Zugstypen (Anzahl Trassen differenziert nach Fern- und Regionalverkehren) und der technische Fortschritt des eingesetzten Rollmaterials im untersuchten Zeitraum (Flottenerneuerung). Die Angebotsveränderung wurde hier im Kapitel diskutiert. Im folgenden Kapitel wird das Rollmaterial im Fokus stehen.

5.2 Analyse des Rollmaterials

5.2.1 Zusammensetzung Rollmaterial

Eine exakte Einschätzung der Flottenerneuerung ist heute nur im Personenverkehr möglich. Im Güterverkehr variiert die Erneuerung der Flotte zwischen den einzelnen Transportunternehmen und Traktionären. Bekannt ist hingegen der geplante Angebotsausbau bis 2025. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die zu erwartenden Veränderungen des Rollmaterials im Personen- und Güterverkehr.

Entwicklung des Rollmaterials nach Zugskategorien			
	Heute	STEP 2025	Wichtigste Veränderung
PV Regio	SBB Regio Dosto Re 420 LION RABe 523 Re 460 — Streckenlokomotive	Regio-Dosto (3x100) 300m Einheitsfahrzeug 75m / (1-teilig) / 75m Einheitsfahrzeug 75m / (2-teilig) / 150m Einheitsfahrzeug 75m / (3-teilig) / 225m Einheits- Doppelstockfahrzeug 150m / (1-teilig) / 150m Einheits- Doppelstockfahrzeug 100m / (2-teilig) / 200m Einheits- Doppelstockfahrzeug 150m / (2-teilig) / 300m	Schon heute ist der Personenverkehr viel leiser als der Güterverkehr. Der Regionalverkehr (S-Bahn) wird in Zukunft vermehrt doppelstöckig und mit höheren Geschwindigkeiten unterwegs sein, was auch zu mehr Lärm führen wird. Technisch werden sämtliche Fahrzeuge mit K-Sohlen ausgerüstet, was lärmindernd wirkt.
PV Fern	RABDe 500 — ICN RABe 503 — SBB ETR 610 EuroCity-Wagen Bpm 51 — Reisezugwagen Re 460 — Streckenlokomotive	ICN Einstöckig 400m FV-Dosto 300m (IC- Version) IPV ETR610/HGZ Einstöckig 400m ICN Einstöckig 400m FV-Dosto 400m (IC- Version) IC2000 Dosto 15-teilig 393m	Die Fernverkehrszüge werden auf den ausgebauten Neubaustrecken schneller unterwegs sein. Scheibenbremsen sind heute schon fast überall vorhanden. Grauguss-Sohlen werden ab 2020 verboten sein.
GV UKV	Rs, Vierachsiger Flachwagen ohne Seitenborden Taschenwagen für Trailer Ks, Zweiachsiger Flachwagen	Taschenwagen für Trailer Rs, Vierachsiger Flachwagen ohne Seitenborden	Die zweiachsigen Güterwagen werden als zuerst ersetzt werden. Heute schon >60 % lärmarme Bremsen (K- und LL-Sohle, bis 2025 sind alle Güterwagen lärmarm. Grauguss-Sohlen werden ab 2020 verboten sein.
GV WLV (wichtigste Wagentypen)	Habbiillns, Gedeckter Vierachser mit Schiebewänden und verriegelbaren Trennwänden Hbbillns 38 Pal Gedeckter Zweiachser mit Schiebewänden und verriegelbaren Trennwänden Eanos, Offener Vierachser für Massengüter	Habbiillns, Gedeckter Vierachser mit Schiebewänden und verriegelbaren Trennwänden Hbbillns 38 Pal Gedeckter Zweiachser mit Schiebewänden und verriegelbaren Trennwänden Eanos, Offener Vierachser für Massengüter	Die zweiachsigen Güterwagen werden als zuerst ersetzt werden. Heute schon >60 % lärmarme Bremsen (K- und LL-Sohle), bis 2025 sind alle Güterwagen lärmarm. Grauguss-Sohlen werden ab 2020 verboten sein.

Entwicklung des Rollmaterials nach Zugskategorien			
	Heute	STEP 2025	Wichtigste Veränderung
	Snps, Vierachsiger Flachwagen mit festen Rungen Rilns Vierachsiger Flachwagen mit verschiebbarem Planenverdeck Uacs Vierachsiger Silowagen mit pneumatischer Entleerung Zweiachsiger Silowagen mit pneumatischer Entleerung	Snps, Vierachsiger Flachwagen mit festen Rungen Rilns Vierachsiger Flachwagen mit verschiebbarem Planenverdeck Uacs Vierachsiger Silowagen mit pneumatischer Entleerung Zweiachsiger Silowagen mit pneumatischer Entleerung	
GV Rola	Vierachsige Niederflurwagen mit sehr kleinem Raddurchmesser	Vierachsige Niederflurwagen mit sehr kleinem Raddurchmesser	Heute schon >60 % lärmarme Bremsen (K- und LL-Sohle), bis 2025 sind alle Güterwagen lärmarm. Grauguss-Sohlen werden ab 2020 verboten sein

Tabelle 5 Zusammensetzung des Rollmaterials nach Zugskategorien

Im Personenverkehr heisst das, dass vor allem das Angebot an S-Bahnen und Regios zunehmen wird. Z. B. im Grossraum Zürich und Genf, wo die Kompositionen jetzt schon an der Kapazitätsgrenze sind. In schnell wachsenden Agglomerationen zwischen den Grossräumen ist die Dynamik der S-Bahn Flottenerneuerung, einhergehend mit einer Kapazitätserweiterung (Einstock- zu Doppelstockfahrzeugen), wohl am grössten. Auf den Fernverkehrslinien sind punktuelle Flottenerneuerungen absehbar. Z. B. sind zur Entlastung der nachfragestarken Streckenabschnitte Genf-Lausanne und Bern-Zürich-Winterthur Doppelstockzüge auf der Ost-West-Achse via Bern in Produktion. Infolge des hohen Rollmaterialanspruchs in den Hauptverkehrszeiten werden nach wie vor alte Rollmaterialkompositionen zum Einsatz kommen. Der Angebotsausbau wächst derzeit schneller als die Flotte, wodurch es zu einer höheren Auslastung kommt. Die Geschwindigkeiten, die ebenfalls Einfluss auf den Lärm haben, werden auf den Neubaustrecken erhöht werden.

Beim Güterverkehr, der besonders lärmrelevant ist, beschloss das Parlament im Jahr 2013, dass die bislang für Neuwagen geltenden Lärmvorschriften (striktere Lärmgrenzwerte) ab 2020 auch für ältere Fahrzeuge verbindlich sein sollen. Dies führt faktisch zu einem Verbot von Fahrten lärmiger Güterwagen auf dem Schweizer Bahnnetz. Davon sind vor allem ausländische Bahnen und Wagenhalter betroffen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die komplette Flotte an Schweizer Schienengüterwagen in naher Zukunft erneuert sein wird.

Somit kann eine qualitative Ableitung bezüglich Lärmentwicklung, sowohl beim Personen- als auch beim Güterverkehr, auf die Frage begrenzt werden, ob die technische Entwicklung (leisere Sohlen, Flottenerneuerung) beim Rollmaterial den zunehmenden Lärm durch den Angebotsausbau (mehr Trassen, höhere Geschwindigkeiten) kompensieren kann. Es ist anzunehmen, dass die Züge etwas leiser unterwegs sind, dafür in höherer Frequenz. Bezüglich Lärmemissionen ist das eine erfreuliche Entwicklung, die Belastung von betroffenen Siedlungsgebieten steigt allerdings an. Aus heutiger Sicht muss deshalb davon ausgegangen werden, dass auf den Strecken, auf denen ein Angebotsausbau stattfindet auch die Belastung durch Lärm zunimmt. Die technische Entwicklung bezüglich Lärmsanierung des Rollmaterials wird die vom Angebotsausbau erhöhte Frequenz der Lärmbelastung nicht kompensieren können.

5.2.2 Analyse der Schallemission

In Tabelle 6 ist die Fahrleistung im Jahr 2012 der Eisenbahnen auf dem schweizerischen Netz getrennt nach Regional-, Fern- und Güterverkehr dargestellt. Der Schienengüterverkehr hat einen eher geringen Anteil an der Fahrleistung von ca. 13 % (Gesamtes Netz), stellt für die Schallemissionen aber die wesentliche Quelle dar, wie im Folgenden dargelegt wird.

	Fahrleistung [Zug-km]	Fahrleistung [%]
Regionalverkehr	120.787.000	55
Fernverkehr	69.699.000	32
Güterverkehr	27.720.000	13
Gesamt	218.206.000	100

Tabelle 6: Fahrleistung der Eisenbahn auf dem schweizerischen Netz 2012 [Zahlen vom BFS]

Der Jahresbericht 2014 Monitoring Eisenbahnlärm der Schweiz [Bundesamt für Verkehr BAV (2015)] zeigt, dass die Schallemissionen vom Güterverkehr deutlich höher sind als die des Personenverkehrs. Bei den Personenzügen wurden im Jahresmittel Vorbeifahrtpegel (TEL (80 km/h)) von 78-83 dB(A) gemessen. Seit 2003 wurde im Personenverkehr eine Minderung > 5 dB erreicht. Bei den Güterzügen wurden im Jahr 2014 um 10 dB höhere Vorbeifahrtpegel (TEL (80 km/h)) von 88-93 dB(A) gemessen. Die Minderung seit 2003 beträgt nur ca. 2 dB. Erschwerend wirkt sich aus, dass der ohnehin schon lautere Güterverkehr vor allem nachts unterwegs ist. Der Anteil des Güterverkehrs an der nächtlichen Schallemission betrug

2014 an den Messstellen zwischen 65 und 95 %. Handlungsbedarf besteht demnach vor allem bei der Reduktion des Güterverkehrslärms.

Der aktuelle Anteil lärmarmen Güterwagen (V-BKS oder Scheibenbremse) in der Schweiz beträgt > 60 %, durch den vollständigen Ersatz der Grauguss-Sohle ist eine Senkung der derzeitigen Vorbeifahrtpegel um 4-5 dB möglich [Bundesamt für Verkehr BAV (2015)]. Dieser Fall sollte spätestens im Jahr 2020 erreicht sein, wenn das Verbot graugussgebremster Güterwagen in der Schweiz einsetzt. Für den Fall, dass die Schallemissionen im Personenverkehr nicht weiter zurückgehen und im Güterverkehr keine weitergehenden schallmindernden Maßnahmen ergriffen werden, wird der Vorbeifahrtpegel der Güterzüge 2020 im Mittel ca. 5-6 dB lauter als der der Personenzüge sein.

Durch die Reduzierung des Anteils graugussgebremster Güterwagen und das Verbot 2020 treten unter der Voraussetzung glatter Schienen andere Schallquellen des Güterverkehrs verstärkt in den Vordergrund. Diese sind fahrzeugseitig vor allem die Anregung durch Radfehler wie Flachstellen und die Schallemission der Lokomotiven.

In Abbildung 17 ist beispielhaft der Pegel-Zeit-Verlauf eines Güterzuges mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h mit Grauguss- und K-Sohle-Wagen dargestellt. An beiden Zugenden befinden sich je zwei TSI-konforme Traxx Lokomotiven der Baureihe 185. Es ist zu erkennen, dass die Schallemission der Lokomotiven bei graugussgebremsten Wagen nicht ins Gewicht fällt, bei K-Sohle-Wagen sind die Lokomotiven jedoch lauter. Zudem besitzen Lokomotiven auch höher gelegene Schallquellen wie Lüfteröffnungen und Dachaufbauten. Für diese Schallquellen stellen niedrige und mittelhohe Schallschutzwände kein Hindernis dar. Der Schalldruckpegel steigt bei der Vorbeifahrt einer Lokomotive für nahe Immissionsorte sehr schnell an. Diese Eigenschaft ist vor allem nachts unter dem Gesichtspunkt von Aufwachreaktionen kritisch zu sehen.

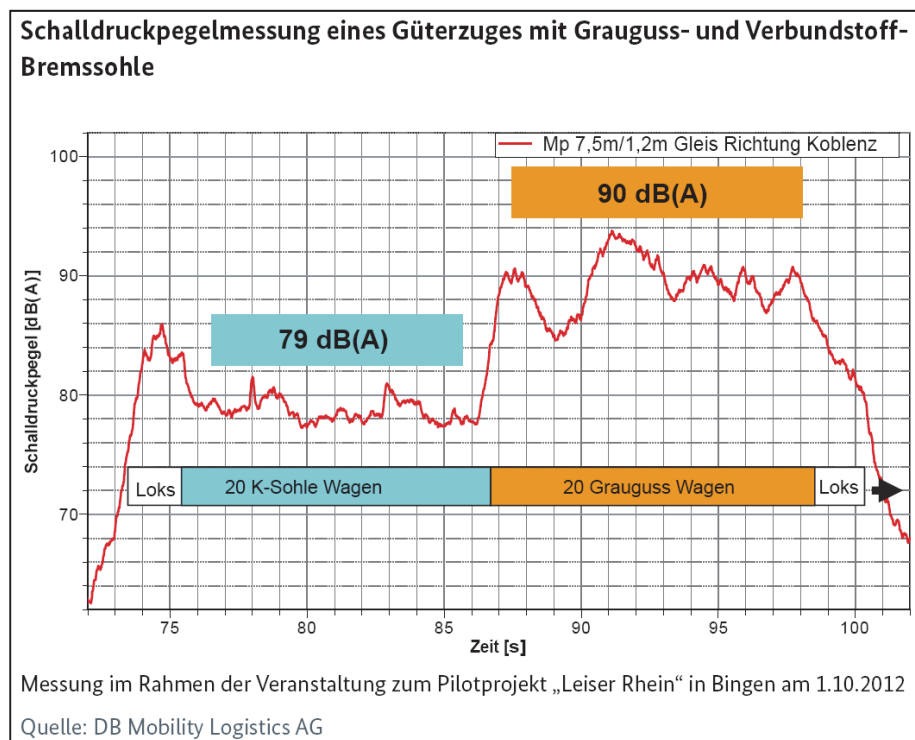


Abbildung 17: Pegel-Zeit-Verlauf eines Güterzuges [BMVBS (2013), S.41]

Um den Schienengüterverkehrslärm insgesamt zu senken, sind also nicht nur Maßnahmen an den Güterwagen erforderlich, sondern die Lokomotiven müssen gegenüber heute deutlich leiser werden. In der TSI-Lärm 2014 [TSI-Lärm (2014)] sind die Grenzwerte für das Vorbeifahrgeräusch von Lokomotiven jedoch höher als die Grenzwerte für das Vorbeifahrgeräusch von Güterwagen.

5.3 Analyse der Bahninfrastrukturen

Bei der Analyse der Bahninfrastrukturen ist zu berücksichtigen, dass bei einer durchschnittlichen Lebensdauer des Oberbaus von 30-40 Jahren Veränderungen in dessen Struktur nur sehr langsam stattfinden. Dies hat zwar den Vorteil, dass man keine schlagartigen Verschlechterungen zu erwarten hat. Gleichzeitig können jedoch neue Erkenntnisse, sei es hinsichtlich der Gleislagequalität, den Geräuschemissionen oder der Wirtschaftlichkeit nur sehr zeitverzögert implementiert werden.

Das Anlagenmanagement Fahrbahn der SBB Infrastruktur hat von 2010 bis 2012 mit dem Projekt „Standardelemente SBB“ ihre Oberbaustrategie bis zum Jahr 2030 definiert und systematisiert. Ziel war es, Streckenkategorien, klassifiziert nach Belastung und Radienklassen einen standardisierten Oberbau zuzuordnen, welcher bei der erwarteten Verkehrsbelastung homogen, funktional, nachhaltig und somit wirtschaftlich ist. Den folgenden Abbildungen

können die gewünschte Oberbauform, der momentane Zustand sowie deren Umsetzungsgrad entnommen werden.

Es zeigt sich deutlich, dass auf hochbelasteten Strecken ein Oberbau bestehend aus Betonschwellen und Schienenprofil 60E1 favorisiert wird. Auf Nebenstrecken sind Stahlschwellen mit dem Schienenprofil 54E2 am wirtschaftlichsten. Dies insbesondere deshalb, weil Stahlschwellen gutmütiger auf Bodensetzungen reagieren und somit bei einem Austausch mit Betonschwellen eine Unterbausanierung nötig wäre.

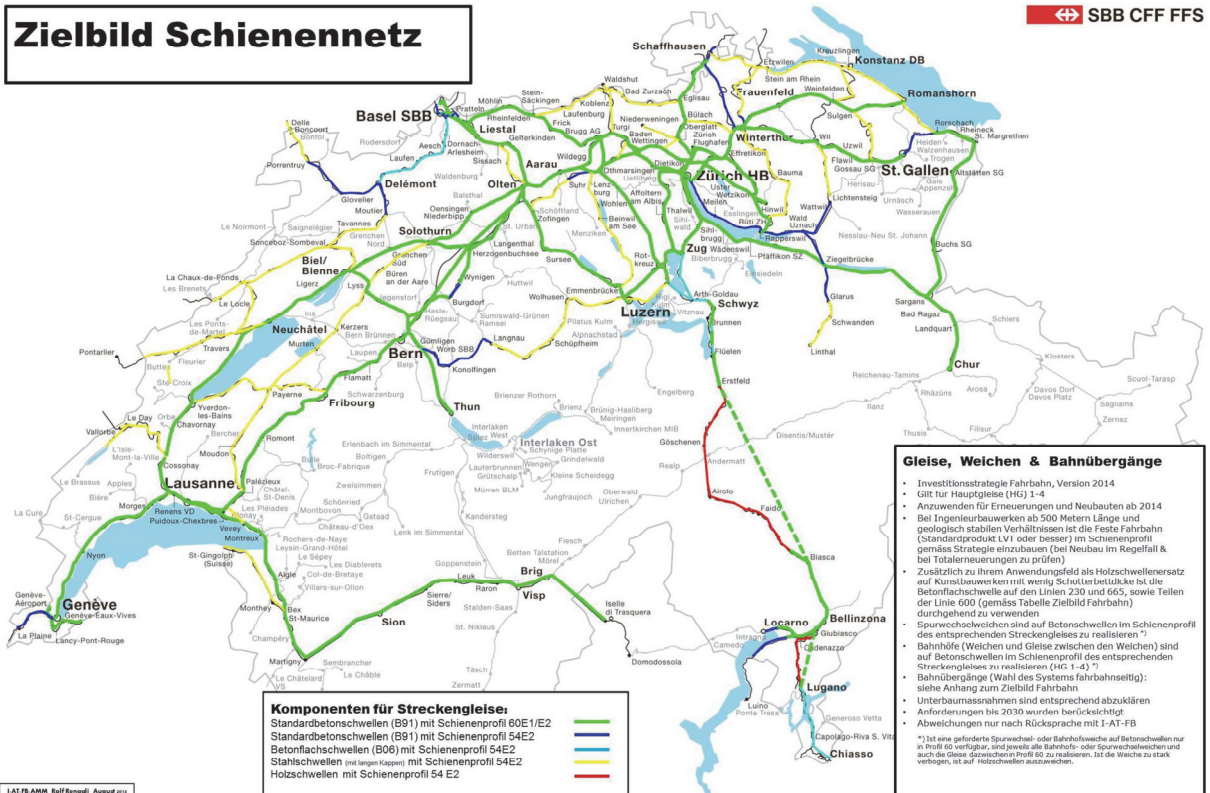


Abbildung 18: Oberbaustrategie [RTE I 22211(2014)]

Schwellenart heute

Quelle: DfA

D. Winklehner, I-AT-FB-AMM, 04.06.2014



Abbildung 19: Aktuelle Oberbauform [Winklehner (2015)]

 SBB CFF FFS

Oberbau Vergleich IST mit Strategie: Über 50% ist bereits im Sinne der Strategie...

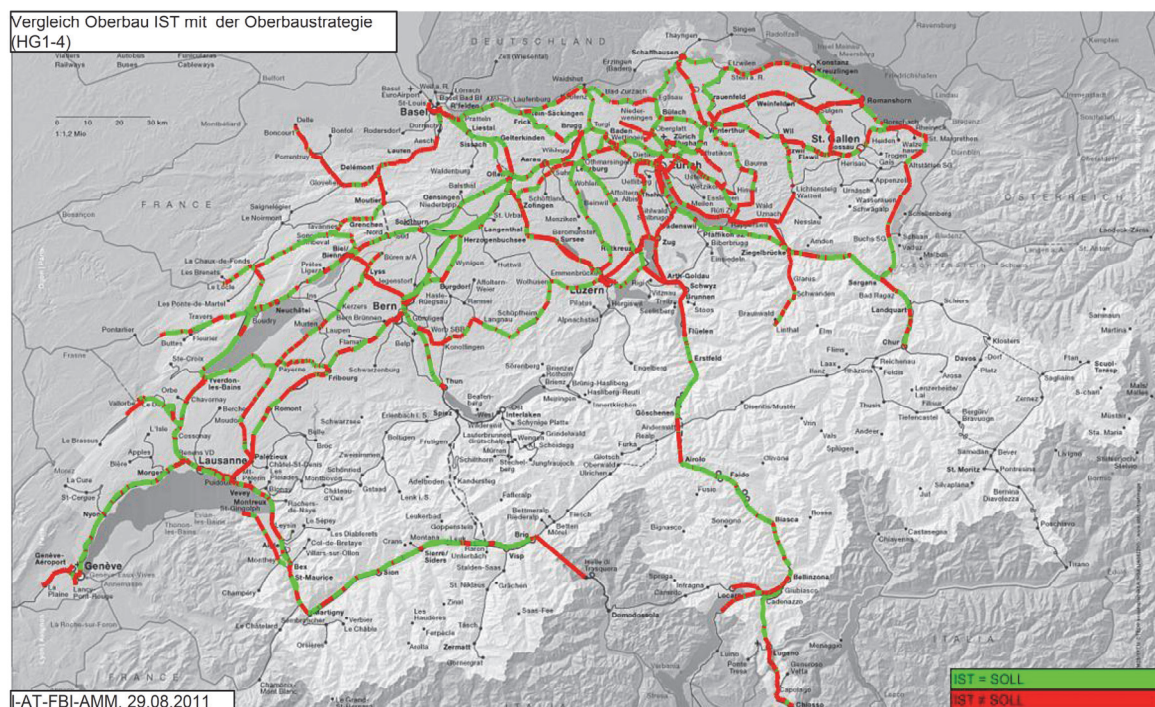


Abbildung 20: Soll-Ist Vergleich Oberbaustrategie Fahrbahn [Holzfeind (2014)]

6 Effizienzanalyse der Forschungsfelder

In diesem Kapitel sollen die in den vorherigen diskutierten Forschungsfelder auf ihre Effizienz hin überprüft werden. Die Haupttrends des vorangegangenen Kapitels werden zuerst kurz zusammengefasst. Diese Trends werden in der Bewertung berücksichtigt, in dem die Reichweite der einzelnen Massnahmen gewichtet wird. Aus den effizientesten Massnahmen wird anschliessend ein geeignetes Forschungsprogramm abgeleitet.

6.1 Trends

6.1.1 Verkehr

- Aufgrund Bevölkerungszuwachs und gesteigertem Mobilitätsbedürfnis wird der Personenverkehr zunehmen.
- Die wirtschaftliche Entwicklung, die Automatisierung sowie Steigerung der Produktionseffizienz werden zu einer Steigerung des Güterverkehrs führen.
- Engpässe in der Infrastruktur sowie in den vorhandenen Trassen werden zu einem Anstieg des nächtlichen Verkehrs führen.

6.1.2 Rollmaterial

- Der Güterverkehr hat verglichen zum Personenverkehr einen eher geringen Anteil an der Fahrleistung, er stellt für Schallemissionen jedoch die wesentliche Quelle dar, auch nach der kompletten Implementierung von Verbundstoffbremssohlen im Jahr 2020.
- Eine Umstellung auf Scheibenbremsen bei neuen Güterwagen würde zu einer erheblichen Lärminderung beitragen. Derzeit werden jedoch nur wenige Güterwagen bei Neubeschaffung mit Scheibenbremsen ausgestattet, meist nur wenn sie staatlich gefördert werden.
- Sobald sämtliche Güterwagen mit Verbundstoffsohlen ausgestattet sind, werden andere Schallquellen verstärkt in den Vordergrund treten (Lokomotiven, Radformfehler sowie Kurvenquietschen o. ä.).

6.1.3 Infrastruktur

- Die Strategie der SBB zielt darauf ab, auf den hochbelasteten Strecken aufgrund der niedrigeren Lebenszykluskosten einen Betonschwellenoberbau einzusetzen. Betonschwellen führen tendenziell zu mehr Lärm.

- Die Akzeptanz von Wänden zu Lärmschutzzwecken sinkt, da die Anrainer zwar weniger Lärm, aber dennoch ungehinderte Sicht haben wollen.
- Geringere Schallemissionen des Rollmaterials lassen Einzelstösse sowie Kurvenquietschen in den Vordergrund treten, welche dann für Aufwachreaktionen verantwortlich sind.

6.2 Bestimmung der Forschungsfelder

Die in Kapitel 2 diskutierten Forschungsfelder sollen nach ihrer Effizienz beurteilt werden. Eine hohe Effizienz ergibt sich aus dem Produkt von geschätztem Lärminderungspotential sowie einer hohen Reichweite. In der folgenden Abbildung 21 sind die verschiedenen Forschungsfelder eingetragen. Das Lärminderungspotential wurde abgeschätzt.

Die Weiterentwicklung des Systems Güterwagen hat die grösste Effizienz, wenn man das vorhandene Lärminderungspotential sowie die Reichweite betrachtet. D. h. eine grosse Anzahl an Personen kann durch eine Verbesserung des Systems Güterwagen in diesem Forschungsfeld vor Lärm geschützt werden. Es gibt jedoch auch Forschungsfelder, wie z. B. ein lärmoptimierter Oberbau, welche zwar nur ein Lärminderungspotential von „nur“ bis zu 4 dB(A) haben, deren Reichweite jedoch das gesamte Eisenbahnnetz betrifft. Andere Massnahmen, wie z. B. die Reduktion von Kurvengeräuschen haben ein erhebliches Potential zur Senkung des Schalldruckpegels, jedoch sind diese nur lokal von Bedeutung.

Die weiteren Forschungsfelder können der folgenden Abbildung entnommen werden. Im folgenden Kapitel werden diese dann genauer beschrieben. Die eingezeichnete diagonale Linie bildet das Produkt aus Reichweite und geschätztem Lärminderungspotential ab und stellt somit das Effizienzlimit dar. Sie ist parallel verschiebbar und kann je nach Anzahl gewünschter Themenfelder zu mehr oder weniger Felder führen.

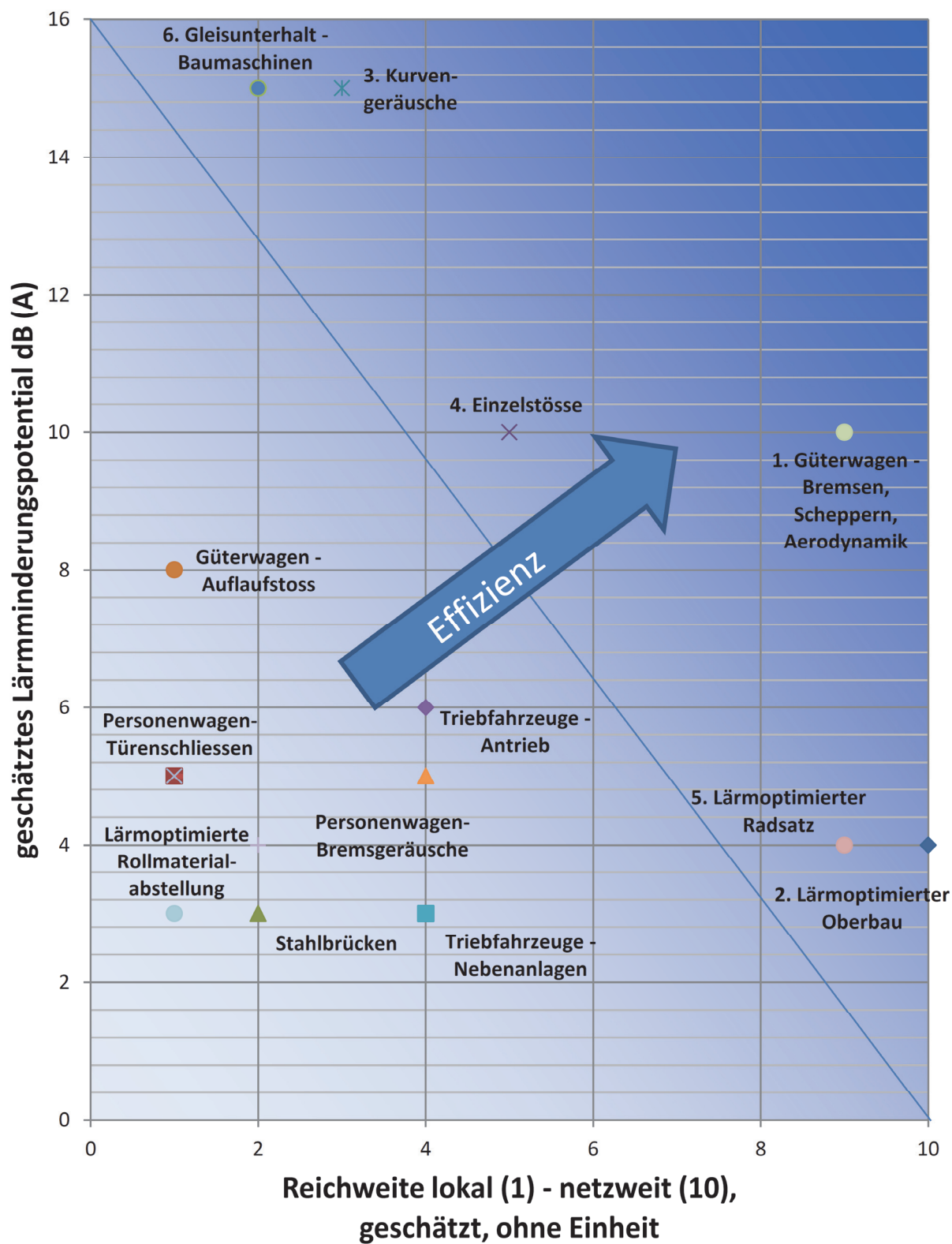


Abbildung 21: Effizienzanalyse der Forschungsfelder

7 Forschungsprogramm

Ziel dieses Berichtes ist die Ermittlung von Themenfeldern, bei denen die Lärmzunahme bzw. die Lärmbelastung am signifikantesten ist, um ein Forschungsprogramm abzuleiten, welches am effektivsten zu einer Reduzierung des Lärms beitragen kann. Im Zuge dieser Studie wurde der aktuelle Stand der Forschung aufgezeigt, sowie ein Stakeholderworkshop durchgeführt. Wie in den entsprechenden Kapiteln ersichtlich, ist das Thema Lärm sowohl in der Forschung als auch in der Wirtschaft präsent, auch besteht ein breiter Konsens über den Handlungsbedarf.

Allen Beteiligten ist bewusst, dass eines der grössten Assets der Bahn ihre öffentliche Wahrnehmung als nachhaltiges und umweltfreundliches Transportsystem ist. Sollte es dem schieneengebundenen Personenverkehr nicht gelingen weiterhin auf hohem Niveau nachhaltig zu produzieren, wird die derzeit breite Akzeptanz in der Bevölkerung sinken und anderen Verkehrsträgern den Vorzug geben. Starke Konkurrenz erfährt das System Bahn durch die hohe Innovationsfreudigkeit und vor allem schnelle Innovationsimplementierung des motorisierten Individualverkehrs (Stichworte Elektromobilität und autonomes Fahren).

Vor allem beim Einbezug der Wagenhalter im Stakeholderworkshop wurde deutlich, dass die schleppende Umsetzung von lärmreduzierenden Massnahmen am Rollmaterial nicht an einem eventuellen Unwillen der verantwortlichen Akteure, sondern vielmehr an der wirtschaftlichen Situation des Schienengüterverkehrs liegt. So mangelt es nicht an Innovationen und Techniken, welche die Lärmemissionen erheblich senken würden. Lärmarme Drehgestelle oder Scheibenbremsen (welche die Lauffläche nicht aufrufen) sind bereits seit Jahrzehnten entwickelt und würden bei vollständiger Implementierung einen Grossteil der Lärmdiskussion obsolet erscheinen lassen. Schon allein die vergleichsweise kostengünstige Umrüstung der Güterwagen auf LL-Sohlen führt zu höheren Unterhaltskosten, welche nicht an die Kunden weitergegeben werden können.

Aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks reagieren die Spediteure sehr preissensitiv auf die Veränderungen im Kostengefüge. Die Halbierung des Ölpreises im Jahr 2014 auf dem Weltmarkt hat dazu geführt, dass Trassen abbestellt wurden und der Gütertransport teilweise und wo möglich auf die Strasse verlagert wurde. So sind den Wagenhaltern die Hände gebunden. Investitionen in Umrüstungen, Nachrüstungen oder Neubeschaffungen im Rollmaterial führen dazu, dass der Betrieb unwirtschaftlich oder nicht wettbewerbsfähig ist.

Hier ist die Politik gefordert, die entsprechenden Rahmenbedingung langfristig sicherzustellen, falls ihr das Verlagerungsziel ernst ist. Vor allem die mit grossen Schritten voranschreitende Entwicklung des autonomen Fahrzeugs wird erheblichen Einfluss auf den Gütertrans-

port haben. Wenn in 15 Jahren Güter per LKW autonom und selbstfahrend von A nach B transportiert werden, dazu noch leise und effizient, wird das Zusammenstellen von Zügen im Einzelladungswagenverkehr mit Schraubkupplung wie ein Anachronismus wirken, welches zwar Nostalgiker verzaubern wird, aber kein ernstzunehmender Konkurrent im Transportgewerbe mehr ist. Damit der Schienengüterverkehr weiterhin wettbewerbsfähig bleibt, braucht es nicht nur Innovationen, sondern auch die Rahmenbedingungen, welche eine Implementierung fördern.

Nichtsdestotrotz gibt es eine Vielzahl von Bereichen, in denen weitere Forschung sinnvoll ist. Die meisten Ansätze fokussieren auf eine Lärminderung auf längere Sicht (z. B. lärmärmerer Oberbau, Weiterentwicklung System Güterwagen). Forschung, welche schnell und kostengünstig zu erheblicher Lärmreduktionen führt ist nicht zu erwarten. Die aufgeführten Forschungsfelder entsprechen in ihrer Reihenfolge ihrer Effizienz, eine möglichst grosse Anzahl an betroffenen Menschen vor Lärm zu schützen.

Die angegebene Dauer sowie die Kosten sind geschätzt und sind daher mit einer grösseren Unsicherheit behaftet. Sie dienen der groben Einordnung und basieren auf Überlegungen der Autoren bzgl. des zu erwartenden Umfangs. Bezüglich des Lärmreduktionspotentials dürfen auf keinen Fall simple Additionen der Reduktionswerte über die verschiedenen vorgeschlagenen Massnahmen gemacht werden, da die Dezibel-Skala logarithmisch ist.

7.1 Weiterentwicklung des Gesamtsystems Güterwagen

Wie in den vorhergehenden Kapiteln ausgeführt, existiert bereits eine breite Palette von Massnahmen zur akustischen Nachrüstung von Güterwagen. Der Einsatz dieser Massnahmen bringt in der Regel jedoch Nachteile mit sich, sei es durch erhöhte Investitionskosten, erhöhte LCC, Gewichtszunahme, Wartungshemmnisse, etc. Durch das alte System sind der akustischen Optimierung des Güterwagens Grenzen gesetzt. Ein gänzlich neues Denken des Systems scheint daher sinnvoll. Dabei wird die Akustik nur einer von verschiedenen Aspekten sein. Dieser darf jedoch nicht vernachlässigt werden, wenn der Güterwagen zukunftsfähig sein soll. Die Anwendung neuerer Technologien scheitert häufig an der bei Güterwagen fehlenden Energieversorgung.

Mit Konzepten für einen weiterentwickelten Güterwagen beschäftigt sich z. B. die Zukunftsinitiative 5L. Die Entwicklung eines Prototyps ist jedoch bislang nicht in Sicht. Im Bereich Akustik geht es um die akustische Optimierung der Systemkomponenten. Es sollte ein anspruchsvolles, zukunftsfähiges Ziel für die Schallemission definiert werden. Dabei muss die Kompatibilität mit dem alten System gewahrt werden. Das neue System darf nicht weniger

zuverlässig und robust als das alte sein. Die Wirtschaftlichkeit ist zu bedenken, die voraussichtlich höheren Kosten müssten durch niedrigere Betriebskosten ausgeglichen werden. Ein neuer Güterwagen sollte aufgrund akustischer Optimierung maximal 5 % teurer sein. Ansätze zur akustischen Optimierung sind beispielsweise der Radsatz (siehe Kapitel 0), das Drehgestell, die Entkopplung des Aufbaus, kompakte Scheibenbremsen mit Gleitschutz sowie eine bessere Aerodynamik zur Reduzierung des Fahrwiderstandes und des aerodynamischen Geräusches, v. a. bei höheren Geschwindigkeiten.

Nicht nur der Aspekt Lärm sollte behandelt werden, sondern auch die Optimierung von Energieverbrauch, Verschleiss, Gewicht, Betrieb, etc. Ideen für einen zukunftsfähigen Güterwagen beinhalten beispielsweise kleinere Räder, höhere Geschwindigkeiten, längere Güterwagen, Energieversorgung für Telematikausrüstungen (Nachverfolgung der Wagen und Ladungen, zustandsorientierte Instandhaltung), etc.

Aufgrund der bereits geleisteten Forschung bietet sich zunächst eine Recherche und breite Diskussion der bisher ausgearbeiteten (Gesamt-)Konzepte an. Hierfür sollten sämtliche in der Transportkette beteiligte Akteure ihre Anliegen äußern.

Dauer [Jahre]	Reichweite	Maximales Reduktionspotential	Kosten
15	Netzweit	10 dB	75 Mil. CHF ⁶

7.2 LCC-, lärm- und erschütterungsoptimierter Oberbau

Aus der Oberbaustrategie der SBB lässt sich gut entnehmen, dass zukünftig die Haupt- und somit am stärksten belasteten Strecken mit Betonschwellen ausgerüstet werden sollen, soweit dies noch nicht geschehen ist. In Hinblick auf die Lebenszykluskosten (LCC) ist dies der wirtschaftlichste Oberbau für hochbelastete Strecken. Nicht relevant für die Oberbaustrategie waren die Auswirkungen auf Lärm und Erschütterungen. Nur die Gesamtbetrachtung aller 3 Facetten kann jedoch ein Optimum ergeben. Werden nur wie aktuell die Lebenszykluskosten betrachtet, führt der Oberbau zu höheren Lärm- und Erschütterungsemissionen. Sobald versucht wird, diesem Problem Herr zu werden durch Schienenstegabsorber, Schienenstegab-

⁶ Ausgegangen wird von 15.000 Schweizer Bestandsgüterwagen, welche durch eine entsprechende akustisch optimierte Neuentwicklung ersetzt werden. Angenommen wird dabei eine höchst zulässige Preissteigerung von 5 % des derzeitigen Neupreises (100.000 CHF) eines Güterwagens.

schirmungen, (niedrigen) Lärmschutzwänden, Unterschottermatten etc. sinken zwar die Emissionen, die LCC der Fahrbahn (inkl. eventueller Lärmschutzbauten) steigen aber erheblich.

Ziel der Forschung sollte ein lärm- und erschütterungsarmer Oberbau mit geringen Fahrweg-LCC sein. Da die Fahrbahn den grössten Teil des Anlagevermögens von Infrastrukturbetreibern ausmacht, ist diesbezüglich eine umfangreiche und langfristige Forschung im Interesse aller Beteiligten. Es braucht eine systematische Analyse der verschiedenen Oberbaukomponenten (Schienenprofil, Befestigung, Zwischenlage, Art und Form der Betonschwelle, Schwellenbesohlung etc.) und des Unterhalts (Stopfen und Schleifen) nach guter wissenschaftlicher Praxis.

Vielfach war bisher bei Versuchen mehr als nur ein Parameter unterschiedlich (z. B. Schwellenbesohlung oder andere Zwischenlagen, jedoch an den Messorten mit unterschiedlicher Untergrund). Die getroffenen Aussagen über die Wirksamkeit bzgl. Lärm oder Erschütterung waren somit nicht übertragbar oder sogar widersprüchlich zu anderen Standorten und Messungen. Meist hing dies mit dem sehr begrenzt zur Verfügung stehenden Zeitumfang und eingeschränkten finanziellen Mitteln zusammen, so dass in kurzer Zeit „schnell“ eine Aussage über die Wirksamkeit dieser oder jener Massnahme getroffen werden sollte.

Sinnvoll wäre in diesem Zusammenhang ein nationaler oder sogar internationaler Forschungsverbund, der Versuche und Messungen koordiniert und auch zentral evaluiert. Nur so sind wissenschaftlich belastbare Aussagen möglich, welche die komplexen Zusammenhänge zwischen den Oberbaukomponenten beschreiben. Dabei darf auch der Einfluss unterschiedlichen Rollmaterials nicht unbeachtet bleiben. Folgendes Vorgehen wäre ratsam:

Beauftragung eines zentralen Koordinators bei einer nationalen Forschungsstelle. Bei finanzieller Planungssicherheit kann dort Kontinuität einer hohen Qualität der Forschung sichergestellt werden. Im Austausch mit den Bahnen entsteht ein nationaler Forschungscluster, der die Forschung koordiniert, abstimmt und auswertet. Auch für den internationalen Austausch ist diese Stelle gesamtschweizerisch zuständig.

Regelmässig werden die Stakeholder (EVU, EIU, Bundesämter etc.) über den aktuellen Stand der Forschung informiert und zum Austausch eingeladen. Sämtliche Einflussfaktoren müssen betrachtet werden und deren Einfluss und deren Zusammenspiel ermittelt werden (USM, USP, Schwellen, Untergrund, Zwischenlagen, Schienenprofil, Schienenrauheit, Rollmaterial).

Dauer [Jahre]	Reichweite	Maximales Reduktionspotential	Kosten
8 – 10	Netzweit	3-5 dB	20 Mil. CHF

7.3 Reduzierung der Kurvengeräusche durch radiale Einstellbarkeit der Radsätze

Überwiegend im Personenverkehr, aber zum Teil auch im Güterverkehr stellt das tonale Kurvenkreischen in engen Gleisbögen eine große Belästigung dar, wie in Kapitel 2.2.1 dargelegt ist. In der Schweiz ist diese Problematik vor allem bei kurvenreichen Nebenstrecken vorhanden. Minderungsmaßnahmen können am Rollmaterial oder an der Infrastruktur ansetzen. Grundsätzlich ist ein möglichst frühes Eingreifen in den Schallentstehungsprozess sinnvoll, am besten ist also eine Vermeidung oder Verringerung der Anregung. Kurvenkreischen tritt erst ab Überschreiten eines bestimmten Anlaufwinkels zwischen Rad und Schiene auf. Die radiale Einstellung der Radsätze im Gleisbogen ist ein wirksamer Ansatz zur Vermeidung von Kurvenkreischen, da es eine Überschreitung des kritischen Anlaufwinkels verhindern kann. Ein weiterer Vorteil der radialen Einstellung im Gleisbogen ist die Minderung des Rollwiderstands und damit einhergehend auch des Rad-Schiene Verschleißes sowie des Energieverbrauchs. Es wurden bereits verschiedene aktive und passive Systeme zur radialen Einstellung entwickelt. Diese werden jedoch aufgrund mangelnder Anreize nicht nachgefragt. Forschungsbedarf wird deshalb vor allem darin gesehen, die vorhandenen Technologien zu vergleichen, wirtschaftlich zu bewerten, die Anwendbarkeit auf das jeweilige Rollmaterial zu prüfen und Anreize zu entwickeln.

- Recherche der möglichen Technologien und deren Anwendbarkeit bei Bestandsfahrzeugen bzw. Neuwagen.
- Untersuchung der Technologien unter Verwendung numerischer Simulation zur Ermittlung der Wirksamkeit zur Reduzierung des Kurvenkreischens und der möglichen Energieeinsparung und Verschleissreduktion. Beachtung des Verhaltens bei Auftreten von Längskräften (Zug- und Bremskräften) zur Vermeidung von Fehleinstellungen.

- Wirtschaftliche Bewertung der untersuchten Technologien.
- Empfehlung einer / mehrerer geeigneter Technologien auf Basis der Simulationsergebnisse und der wirtschaftlichen Bewertung.
- Einbau der empfohlenen Technologien in Versuchsfahrzeuge und Überprüfung des Nutzens zur Minderung von Kurvenkreischen.
- Ausarbeitung von Anreizen und/oder Verpflichtungen, damit die Technologien auch angewendet werden, z. B. verschleißabhängiges Trassenpreissystem, Grenzwerte für Kurvenkreischen, Umrüstprogramme, etc.

Dauer [Jahre]	Reichweite	Maximales Reduktionspotential	Kosten
5	Lokal	15 dB	4-12 Mil. CHF ⁷

7.4 Reduzierung von Einzelstössen

Gerade in den dicht besiedelten Bereichen von Bahnhöfen kommt es zu einer Anhäufung verschiedenster Stösse, welche auf die Wahrnehmung des Schienenlärms einen hohen negativen Einfluss haben. Dies sind Isolierstösse für die Gleisfreimeldung in den Gleisstromkreisen, Herzstücklücken in den Weichen sowie vielfach Stosslücken aufgrund enger Radien. In der Nacht wird die Aufwachselle nicht von den reinen Fahrgeräuschen überschritten, welche an einer normalen Strecke kontinuierlich ansteigen und dann wieder abschwelen, sondern durch Einzelstösse, welche die Aufwachselle überschreiten.

Hierzu sind bereits mehrere Forschungsprojekte am Laufen (SBB Projekt „Upgrade Weiche“, ETH Zürich „lückenlos verschweisste Gleise in engen Bögen“), diese sollten unterstützt und forciert werden. Des Weiteren könnten Schutzweichen durch Entgleisungsvorrichtungen ersetzt werden, was jedoch normative Veränderung bedingt. Hier könnte entsprechende Forschung nötig sein, um eine Anpassung der Normen zu legitimieren. Hier wären folgende Schritte zu unternehmen:

- Finanzielle Unterstützung oder Schaffung einer neuen Stelle, welche die Beseitigung von Einzelstössen koordiniert bei einem Eisenbahninfrastrukturunternehmen.

⁷ Ausgegangen wird von Mehrkosten von 400 CHF pro Drehgestell.

- Anerkennung des Einzelstosses als Problem aufgrund der Aufwachschwelle.

Dauer [Jahre]	Reichweite	Maximales Reduktionspotential	Kosten
10	Lokal	10 dB	2 Mil. CHF

7.5 Praxistauglicher schalloptimierter Radsatz

Bei Radsätzen sind die Sicherheitsanforderungen kritisch, da sie nicht redundant ausgeführt werden können und ein Versagen zu Entgleisung führt. Zulassungsfähige Weiterentwicklungen müssen die geltenden Normen und Anforderungen an die Festigkeit einhalten. Bei der Weiterentwicklung von Radsätzen stehen Aspekte wie LCC, Verschleiß und Ermüdung im Vordergrund (z. B. [Ghidini, A; Durif, M (2015)]). Die Akustik wird hingegen nicht beachtet. Eine systematische Optimierung der Räder unter akustischen Gesichtspunkten scheint jedoch lohnenswert, da die Radsätze einfach austauschbar sind und keine Wartungshemmnisse durch den Austausch entstehen und keine zusätzlichen Komponenten in das System eingebracht werden.

Das Problem bisheriger Forschungsprojekte zur akustischen Optimierung von Radsätzen bestand häufig darin, dass die Ergebnisse in der Praxis nicht einsatzfähig waren. Eine weitere Erforschung schalloptimierter Räder sollte auf den bisherigen Ergebnissen und Simulationen aufbauen, dabei aber die Praxistauglichkeit nicht aus den Augen verlieren. Die tatsächliche Anwendbarkeit und Zulassungsfähigkeit muss mindestens die gleiche Priorität wie die Minderungswirkung haben.

Gesichtspunkte, unter denen das Rad akustisch optimiert werden könnte, sind:

- Geringere Anregbarkeit:
Erhöhung der Eingangsimpedanz durch Erhöhung der Steifigkeit. Eine Erhöhung der Steifigkeit verschiebt zudem die Resonanzfrequenzen nach oben in einen weniger relevanten Frequenzbereich.
- Geringere Schwingungsamplituden:
 - Optimierung der Radform. Ein symmetrischer Querschnitt führt zu einer geringeren Kopplung der Moden.
 - Dämpfung der Schwingung z. B. dämpfende Beschichtung.
- Geringere Abstrahlung

- Gelochte Räder oder Speichenräder (reduzierte abstrahlende Fläche und akustischer Kurzschluss bei tiefen Frequenzen). Die Wärmeabfuhr beim Bremsen muss gewährleistet sein.
- Kleinerer Raddurchmesser (reduzierte abstrahlende Fläche). Zudem werden die Moden in einen höheren Frequenzbereich verschoben. Es muss auf die Einhaltung der thermischen Belastbarkeit beim Bremsen geachtet werden. Eine Lösung könnte der zunehmende Einsatz der rekuperativen Bremse darstellen. Bei kleineren Rädern sollte die Rauheitsentwicklung und Polygonisierung untersucht werden. Die stark streuenden Messergebnisse des Rollgeräusches von ROLA-Fahrzeugen weisen auf große Unterschiede der Räder hin. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand könnten die Auswirkungen der höheren mechanischen Spannungen aufgrund der kleineren Radaufstandsfläche auf die Festigkeit und Materialermüdung von Rad und Schiene sein.
- Abschirmung des Rades, z. B. durch Radbremsscheiben.

Geschätzter Zeitbedarf:

Modellierung schalloptimierter Radsätze, Parametervariation: 3 a

Herstellung und Untersuchung von Prototypen: 2 a

Zulassung eines / mehrerer geeigneter Radsätze: 2 a

Neben der Praxistauglichkeit ist die Frage der Kosten relevant. Der neue Radsatz sollte in der Anschaffung nicht wesentlich teurer sein als die gängigen Radsätze. Alternativ könnte über eine verpflichtende Einführung für Neuwagen und einen verpflichtenden Austausch bei Bestandsfahrzeugen nachgedacht werden. Es ist zu beachten, dass die LCC des neuen Radsatzes auf keinen Fall höher sind als die der aktuell verwendeten Radsätze.

Dauer [Jahre]	Reichweite	Maximales Reduktionspotential	Kosten
7	Netzweit	4 dB	12 Mil. CHF ⁸

⁸ Ausgegangen wird von 15.000 Schweizer Güterwagen und maximalen Kosten für eine akustische Optimierung von 200 CHF pro Radsatz.

7.6 Innovation Gleisbaumaschinen

Im Eisenbahnsektor begegnet man häufig dem Argument, der Lärm von Gleisbaumaschinen sei nicht relevant, da das Ereignis an einem Ort so selten auftritt. Dieses Argument ist jedoch nicht stichhaltig, da das Ereignis zwar selten ist, dafür aber über einen längeren Zeitraum auftritt (je nach Gleisbaumaschine schätzungsweise zwischen 30 Minuten und 5 Stunden) und außerdem in der Nacht. Die Belastung, die von Gleisbaumaschinen ausgeht ist deshalb sehr groß.

Die Lärmemission von Gleisbaumaschinen ist bisher nur in der Überführung begrenzt. Dort sind sie den lautesten Fahrzeugen, den Diesellokomotiven gleichgestellt. Im Arbeitsmodus sind allen voran die Berufsgenossenschaften bemüht, unter Berücksichtigung von persönlichem Gehörschutz, meist Kapselgehörschützer, die Arbeitsbedingungen erträglich zu machen. Technisch sind die Gleisbaumaschinen meist ohne Lärminderungsmaßnahmen ausgeführt. Bezüglich der Lärminderung sind neue Gleisbaumaschinen auf dem Stand von Straßenbaumaschinen aus den 1950er und 1960er Jahren. Da besonders im Fahrwerk und im Aufbau Standardkomponenten mit der Dieselhydrostatik kombiniert werden, entsteht oft unerwartet großer Lärm. Sowohl auf der Herstellerseite als auch auf der Bestellerseite (Gleisbauunternehmungen, private und teilweise noch im Besitz der Bahngesellschaft z. B. RhB) sind die Kenntnisse zur Akustik gering. Die Maschinen selbst sind im Arbeitsgang deutlich über 100 dB(A) laut. Die Arbeitsgeschwindigkeit ist oft gering, typisch sind z. B. 60 bis 100 m/h für Bettungsreinigungsmaschinen. In der Auf- und Abrüstphase kann die Maschine bis zu 1 h am selben Ort betrieben werden.

Ein weiteres Problem ist die Wahrnehmung der akustischen Warneinrichtungen für die Mitarbeiter. Wegen des lauten Maschinenlärms und der Gehörschützer muss die akustische Warneinrichtung besonders durchdringlich und damit laut sein.

Bei Stopfmaschinen gibt es bereits leisere Ausführungen in Japan, die aber aufgrund anderer Lichtraumprofile und Arbeitsaufgaben nicht unangepasst in Europa verwendet werden können. Durch die Schalldämmung wird der Schalldruckpegel in 25 m Entfernung auf 70 dB(A) reduziert.

Es gibt auch leisere, elektrisch angetriebene Stopfmaschinen. Allerdings kann die Fahrleitung nicht immer als Energiequelle genutzt werden, da diese bei Gleissperren häufig abgeschaltet wird, wenn in benachbarten Gleisabschnitten andere Arbeiten erledigt werden, die eine Abschaltung erfordern.

Forschungsbedarf besteht sowohl hinsichtlich der Lärminderung der Antriebstechnik, meist dieselhydrostatisch, als auch der Arbeitsvorgänge wie Stopfen, Schotter sieben, Schotter mit Räumförderketten ausbauen, verdichten u. a. mehr. Mit ersten Forschungsaufwendungen sollte eine Reduktion von 10 dB(A) bei den lautesten Maschinen (Bettungsreinigungsmaschinen und Stopfmaschinen) möglich sein. Der Nutzen der Lärminderung der Gleisbaumaschinen wird durch die dann mögliche Reduktion der Lautstärke der Warneinrichtungen, wie oben genannt, noch deutlich verstärkt.

Dauer [Jahre]	Reichweite	Maximales Reduktionspotential	Kosten
5	Lokal	15 dB	4-30 Mil. CHF ⁹

⁹ Ausgehend von ca. 20 Gleisbaumaschinen, welche im Schweizer Netz eingesetzt werden, entstehen Mehrkosten von 1,5 Mio. CHF pro Maschine durch eine akustische Optimierung.

8 Literatur

- Adler, K und Hauff, C und Pardey, A (2015) Gleisbaustellensicherung – aktuelle Entwicklungen, Eisenbahningenieur – EI 05/2015, S. 18
- ARE (2012): Ergänzungen zu den schweizerischen Verkehrsperspektiven bis 2030, Bern
- Attinger, R. (2013) Besprechung „Monitoring Eisenbahnlärm Konzept Schweiz“, Präsentation, Bundesamt für Verkehr BAV, Bern.
- Barth, M und Presle, G (2009) Projekt Low Noise-Train – Ergebnisse und Ausblick, ETR November 2009
- Bopp, B. (2014) Das Verhalten von lückenlos verschweissten Gleisen (LVG) in engen Radien der Meterspur, Dissertation, ETH Zürich
- BAV (2015) Dokumentation Planungsgrundlagen STEP Ausbauschrift 2030
<http://www.bav.admin.ch/fabi/04578/?lang=de>
- BMVBS (2013) Lärmschutz im Schienenverkehr – Alles über Schallpegel, innovative Technik und Lärmschutz an der Quelle, Berlin
- Bundesamt für Verkehr BAV (2015) Monitoring Eisenbahnlärm – Jahresbericht 2014
- Czolbe, C. und P. Huber (2014) Lärmprognosen mit messtechnischem Input aus dem Oberbau.
- DB Netze (2012) Schlussbericht: Innovative Massnahmen zum Lärm- und Erschütterungsschutz am Fahrweg.
- EU (2008) In-field measurements of the influence of voestalpine VA71b rail on railway noise, EU-Forschungsrahmenprogramm No. FP6-516420
- EuKo (2003) Positionspapier über die europäischen Strategien und Prioritäten zur Bekämpfung des Schienenverkehrslärms, Europäische Kommission 2003
- Faigle (2014): <http://www.faigle.com/produkte-loesungen/branchenloesungen/waggonbau-schienenfahrzeuge/buchsen-zum-bremsgestaenge-von-drehgestellen-fuer-gueterwaggons.aspx>, Zugriff: 22.04.2015
- Fendrich, L. (2013) Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Springer Vieweg
- Gessner, R (2002) Schienenverkehrslärm – Senkung der Rad/Schiene-Geräusche; EI – Eisenbahningenieur (53) 23-25.
- Ghidini, A; Durif, M (2015) In search of longer wheel life, Railway Gazette International, Juli 2015, S.60-61
- Hecht, M und Czolbe, C (2008) BMU-Projekt Lärminderungsmaßnahmen an drei Großdiesellokomotiven BlueTiger, ZEVrail Glasers Annalen 132 (2008), S. 11-12
- Hecht, M und Zogg, H (1995) Lärmdesign moderner Triebfahrzeuge am Beispiel der Lok2000-Familie

- Hemsworth, B und Jones R R K (2000) Silent freight Project – Final report
- Infras (2011) Auswirkungen der Fertigstellung der NEAT auf die Erreichung des Verlagerungsziels im Güterverkehr, im Auftrag BAV, Bern / Zürich
- Infras/BAK (2012) Marktanalyse und Marktprognose Schienengüterverkehr 2030, im Auftrag VÖV, Bern/Zürich
- IWF (2015) Optimierung der Schienepflege zur Reduktion der Lärmemissionen im Schweizer Eisenbahnnetz, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, ETH Zürich
- Johannsen, K (2005) Der Einfluss der Oberflächenimpedanz auf das Abstrahlverhalten eines Schürze-Niedrigschallschirm-Systems, Dissertation TU Berlin
- Knorr-Bremse (ohne Datum) Ölfreier Kompressor: <http://www.knorr-bremse.com/media/documents/railvehicles/de/09-P-1181-DE-01neu.pdf>, Zugriff: 07.05.2015
- Krüger, F (Hrsg.) (2013) Kurvengeräusche – Messung, Bewertung und Minderungsmaßnahmen, Erich Schmidt Verlag
- Kure, G; Skiller, J; et al. (2007) Gigabox – Integration der Gummifeder mit hydraulischer Dämpfung in das Radsatzlagergehäuse; 37. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge
- Lucchini RS (2015) The low noise wheels: http://www.lucchinirs.it/media/prodotti_innovativi/The_low_noise_wheels.pdf, Zugriff: 28.04.2015
- Lutzenberger, S und Gutmann, C (2013) Ermittlung des Standes der Technik der Geräuschemissionen europäischer Schienenfahrzeuge und deren Lärmmindeungspotenzial mit Darstellung von Best-Practice-Beispielen
- Marshall, T und Fenech, B A und Greer, R (2013) Derivation of Sound Emission Source Terms for High Speed Trains Running at Speeds in Excess of 300 km/h, Proceedings of the 11th International Workshop on Railway Noise, Udevalla, Sweden 2013
- Matisa (2015) http://www.matisa.ch/en/matisa_b20.html, Zugriffsdatum: 24.07.2015
- Prose (2015) Lärmauswirkung von Unterschottermatten, Bericht 04-03-01039
- STARDAMP (2015) Starnberg, M., Asmussen, B. und Stangl, M. STARDAMP – Ein einfaches Laborverfahren zur Bewertung der Wirkung von Schienendämpfern, ZEVrail 139 (2015), S.276 ff.
- Thompson, David (2009) Railway Noise and Vibration, Elsevier Verlag
- TSI-Lärm (2014) VERORDNUNG (EU) Nr. 1304/2014 DER KOMMISSION vom 26. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lärm“ sowie zur Änderung der Entscheidung 2008/232/EG und Aufhebung des Beschlusses 2011/229/EU
- UIC B 126/RP 43 (2013) Braking Questions – Synthesis paper on the EuropeTrain operation with LL-brake blocks – Management Summary

Voith (2012) Vorsprung durch Forschung. Das Projekt Ecoquest, Broschüre,
http://www.voith.com/en/1962_d_2012-07-31-g2283-ecoquest_d_screen.pdf, Zugriff
06.05.2015

Wiemers, M (2004) Einfluss von Steifigkeit und Dämpfung bei Eisenbahnrädern,
insbesondere von Güterwagenrädern, auf die Schallabstrahlung, Dissertation TU Berlin